



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## NF ZESILOVAČ PRO INDUKČNÍ SMYČKU

INDUCTION LOOP AMPLIFIER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Flek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vilém Kledrowetz, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Petr Flek

**ID:** 164266

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Nf zesilovač pro indukční smyčku

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou audio indukční smyčky pro nedoslýchavé, se způsoby možné realizace se zaměřením zejména v oblasti drážní dopravy.

Navrhněte koncepci zesilovače pro indukční smyčku pracující při napájecím napětí odpovídajícím ČSN EN 50155 pro drážní kolejová vozidla. Navržená koncepce a vlastní zařízení musí plnit požadavky platných norem ČSN EN, norem pro oblast EMC pro provoz na drážních kolejových vozidlech a předpisů TSI.

Navrhněte obvodové zapojení tohoto nf zesilovače pro indukční smyčku pro drážní kolejová vozidla. Realizujte funkční vzorek elektroniky nf zesilovače pro indukční smyčku, včetně desky plošných spojů. Nf zesilovač svým výstupním výkonem pokryje běžně používaná osobní drážní kolejová vozidla a bude provozován v rozsahu teplot -40°C až +70°C.

Zhodnoťte váš návrh nf zesilovače pro indukční smyčku a prakticky dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Vilém Kledrowetz, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. František Stříž, UniControls-Tramex s.r.o.

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce bylo zaměřit se na problematiku a realizaci indukční smyčky pro drážní vozidla, navrhnout a sestrojít funkční vzorek elektroniky zesilovače, který splňuje všechny požadované nároky. Práce zahrnuje podrobné informace o celkovém systému indukční smyčky týkající se jejího návrhu, umístění a výkonu. Druhá část práce pojednává o návrhu zesilovače, jeho realizaci a měřených parametru pro splnění daných nároků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Zesilovač, třída D, indukční smyčka, naslouchátko

## **ABSTRACT**

The goal of this master thesis was to study the theory and to realize an induction loop for railway rolling vehicles, to design and manufacture a functioning prototype of electronic amplifier, which carries out all the requirements. This thesis includes detailed information about the induction loop system, its position and performance, following with the design of the amplifier, execution of the design and with the conclusion of measured parameters for the accomplishment of the required parameters.

## **KEYWORDS**

Amplifier, class D, inductive loop, hearing aid

### **Bibliografická citace:**

FLEK, P. *Nf zesilovač pro indukční smyčku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vilém Kledrowetz, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Nf zesilovač pro indukční smyčku* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vilému Kledrowetzovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé práce. Dále děkuji pracovníkům vývojového oddělení firmy UniControls – Tramex, především panu Ing. Františku Střížovi, za odborné konzultace.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# **OBSAH**

<b>1 Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2 Indukční smyčka</b>	<b>15</b>
2.1 Funkce systému s indukční smyčkou.....	17
<b>3 Naslouchadla</b>	<b>18</b>
<b>4 Vodiče pro audio indukční smyčku</b>	<b>19</b>
4.1 Příklady vodičů pro konstrukci smyčky: .....	19
4.1.1 Samostatný vodič:.....	19
4.1.2 Plochý pásek: .....	19
4.1.3 Úložný kabel: .....	20
4.1.4 Kroucená dvojlinka:.....	20
<b>5 Návrh smyčky</b>	<b>21</b>
5.1 Umístění smyčky .....	21
5.2 Systémy smyčky .....	21
5.2.1 Jednoduchý systém: .....	21
5.2.2 Kvadrurní systém .....	22
5.2.3 Rozšířený kvadrurní systém.....	23
<b>6 Vozidlo</b>	<b>24</b>
<b>7 Magnetické pole</b>	<b>26</b>
7.1 Magnetické indukční čáry.....	26
7.2 Intenzita magnetického pole .....	26
7.2.1 Intenzita magnetického pole v obdélníkové smyčce .....	27
7.3 Šíření magnetického pole.....	28
<b>8 Indukční systém pro drážní kolejová vozidla</b>	<b>29</b>
8.1 Umístění smyčky .....	29
8.2 Ztráty v železe.....	30



<b>9</b>	<b>Audio zesilovač pracující ve třídě D</b>	<b>31</b>
9.1	Koncové tranzistory .....	32
9.2	Výstupní filtr .....	32
<b>10</b>	<b>Transformátor</b>	<b>33</b>
10.1	Vinutí .....	33
<b>11</b>	<b>Alternativa indukční smyčky</b>	<b>34</b>
11.1	Popis funkce .....	34
<b>12</b>	<b>Zesilovač pro indukční smyčku</b>	<b>36</b>
12.1	Požadavky norem .....	36
12.1.1	Požadavky na provozní teplotu .....	36
12.1.2	Požadavky na vstupní napětí .....	36
12.1.3	Požadavky na magnetické pole .....	37
12.2	Výkon zesilovače .....	37
12.2.1	Teoretické odhadnutí výkonu: .....	38
12.2.2	Praktický výkon zesilovače .....	38
12.3	Jednotlivé komponenty zesilovače .....	39
12.3.1	Vstupní filtr .....	40
12.3.2	Oddělovací transformátor .....	41
12.3.3	Pásmová propust .....	41
12.3.4	Korekční předzesilovač .....	42
12.3.5	Limiter .....	42
12.3.6	Koncový stupeň .....	42
12.3.7	Výstupní filtr .....	43
12.3.8	Řídicí mikropočítač .....	43
12.3.9	Led indikace .....	43
12.3.10	Ovládání zesilovače .....	43
12.3.11	Digitální teploměr .....	44
12.3.12	Výstupní transformátor .....	44
12.3.13	Napájecí zdroje .....	46

<b>13</b>	<b>Softwarové vybavení zesilovače</b>	<b>47</b>
13.1	Provozní režim.....	48
13.1.1	Limitace výkonu .....	48
13.2	Servisní režim .....	49
13.3	Chyby zesilovače indikované LED.....	49
13.3.1	V servisním režimu:.....	50
13.3.2	Během provozu .....	50
<b>14</b>	<b>Naměřené výsledky</b>	<b>51</b>
14.1	Pásmová propust .....	51
14.2	Korekční předzesilovač.....	51
14.3	Celkový výkon.....	55
<b>15</b>	<b>Výsledky EMC měření</b>	<b>56</b>
<b>16</b>	<b>Přípravek pro oživení zesilovače</b>	<b>58</b>
16.1	Výpočty pro přípravek.....	58
	<b>Závěr</b>	<b>60</b>
	<b>Literatura</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>63</b>

# Seznam obrázků

Obr. 1: Mezinárodně přijatý grafický symbol označující prostory vybavené indukční smyčkou [1] .....	15
Obr. 2: Prvky systému [2].....	16
Obr. 3: Indukční smyčka v místnosti [2] .....	16
Obr. 4: Indukční smyčka pod deskou stolu [2].....	17
Obr. 5: Magnetické pole v rovině jedné osy čtvercové smyčky [2] .....	17
Obr. 6: Naslouchadlo [2] .....	18
Obr. 7: Blokové schéma naslouchadla [5].....	18
Obr. 8: Samostatný vodič [4].....	19
Obr. 9: Plochý pásek [4] .....	20
Obr. 10: Úložný kabel [4] .....	20
Obr. 11: Kroucená dvojlinka [4].....	20
Obr. 12: Umístění smyčky [5] .....	21
Obr. 13: Jednoduchý systém s jednou smyčkou [5] .....	22
Obr. 14: Jednoduchý systém s dvojitou smyčkou [5].....	22
Obr. 15: Jednoduchý systém, jedna smyčka na zesilovač [5].....	22
Obr. 16: Jednoduchý systém, více smyček na zesilovač [5].....	23
Obr. 17: Rozšířený kvadraturní systém [5].....	23
Obr. 18: Modernizovaný vůz Bdpee231 .....	24
Obr. 19: Audio indukční smyčka ve vozidle [2].....	24
Obr. 20: Náčrt umístění indukční smyčky ve vozidle .....	25
Obr. 21: Rozměry vozidla.....	25
Obr. 22: Magnetické indukční čáry okolo vodiče [6].....	26
Obr. 23: Intenzita magnetického pole $H$ v závislosti od vodiče [8] .....	27
Obr. 24: Obdélníková smyčka .....	27
Obr. 25: Šíření magnetického pole mimo místnost [2].....	28
Obr. 26: Redukce šíření magnetického pole mimo místnost [2] .....	28
Obr. 27: Pokrytí vagonu magnetickým polem.....	30
Obr. 28: Zjednodušené zapojení zesilovače třídy D [11] .....	31
Obr. 29: Zobrazení průběhů napětí na vstupech a na výstupu komparátoru [11].....	31
Obr. 30: Transformátor [13] .....	33

Obr. 31: Grafický symbol označující prostory vybavené infračerveným systémem [14]	34
Obr. 32: Specifické zapojení infračerveného systému [14]	35
Obr. 33: Elektronika zesilovače pro indukční smyčku	36
Obr. 34: Blokové schéma zesilovače pro indukční smyčku	40
Obr. 35: Filtř [16]	41
Obr. 36: Zesilovač TDA7498	42
Obr. 37: Řídící mikropočítač [19]	43
Obr. 38: Binární přepínače[20]	44
Obr. 39: Digitální teploměr [21]	44
Obr. 40: Výstupní transformátor	45
Obr. 41: Závislost útlumu transformátoru na frekvenci u odboček 0,5 $\Omega$ ; 0,4 $\Omega$ ; 0,3 $\Omega$ .	45
Obr. 42: Měnič VICOR [22]	46
Obr. 43 Vývojový diagram programu	47
Obr. 44: Měřená charakteristika pásmové propusti	51
Obr. 45: Základní měření korekčního zesilovače	52
Obr. 46: Softwarově upravený maximální výkon bez útlumu na 1 kHz	53
Obr. 47: Měření s útlumem na frekvenci 1 kHz	54
Obr. 48: Výsledné měření korekčního předzesilovače	54
Obr. 49: Elektronika zesilovače s převodním transformátorem	55
Obr. 50: Výsledky EMC vyzařování z kabelu	56
Obr. 51: Výsledek měření rušení zařízení	57
Obr. 52: Schéma zapojení přípravku pro oživení zesilovače	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Výkon zesilovače v závislosti na nastavení přepínače S1 .....	39
Tabulka 2: Seznam DC/DC měničů.....	46
Tabulka 3: Softwarové nastavení korekcí pomocí přepínačů S2 – S4 .....	52
Tabulka 4: Výsledky doměření EMC .....	57

# 1 ÚVOD

Cílem diplomové práce bylo zaměřit se na problematiku audio indukční smyčky pro nedoslýchavé, navrhnout a sestavit funkční vzorek zesilovače pro indukční smyčku vyhovující provozu pro drážní kolejová vozidla.

Možnosti přijímání signálu z magnetického pole se u naslouchátek využívalo již dříve. Naslouchátko přijímalo slabé magnetické pole generované reproduktorem v telefonním sluchátku a zvuk zesilovalo přímo uživateli. Stejného principu se využívá i u systému s indukční smyčkou. Magnetické pole, které vzniká okolo vodiče, ve kterém protéká proud, je za určitých podmínek možné přijímat pomocí naslouchátka. Tento systém výrazně pomáhá lidem se sluchovým postižením.

Existuje několik tříd zesilovačů, z nichž nejvhodnější pro tento systém je zesilovač ve třídě D. Třída D se vyznačuje hlavně vysokou účinností a díky integraci i jednoduchým zapojením a malými rozměry. Vznikající útlumy na různých frekvencích indukční smyčky je třeba kompenzovat. K tomu byl použit korekční předzesilovač řízený mikropočítačem ATtiny2313. Pro potřebu velkých výstupních proudů do smyčky byl použit převodní toroidní transformátor.

Nainstalováním tohoto systému usnadníme lidem se sluchovým postižením lepší orientaci a větší komfort při cestování vlakem.

## 2 INDUKČNÍ SMYČKA

Indukční smyčka byla vyvinuta s cílem usnadnit sluchově postiženým osobám příjem zvukových informací a zlepšit jejich srozumitelnost. Mnoho naslouchátek je vybaveno přepínačem, který v režimu „T“ (Tele-coil) nebo „MT“ (Microphone, tele-coil) umožňuje příjem signálu magnetického pole, který je generován indukční smyčkou. Naslouchadlo převádí přijatý signál na zvuk, kterému uživatelé rozumí. Pro příjem vysílaného signálu musí být osoba s naslouchacím zařízením uvnitř, nebo v blízkosti audio indukční smyčky.

Funkce vnímat signál z magnetického pole nebyla původně určena pro systém s indukční smyčkou. Naslouchací přístroj dokáže přijímat slabé indukční pole vytvářené malou cívkou reproduktoru v telefonním sluchátku, čímž se vyloučí případné nežádoucí zkreslování zvuku reproduktorem nebo vzduchem. Tímto způsobem je možné dosáhnout kvalitní příjem zvukových signálů a zlepšení srozumitelnosti mluveného slova.

V současné době je možné pokrýt signálem indukční smyčky už i celé divadelní nebo koncertní sály a toto řešení poskytuje sluchově postiženým osobám téměř plnohodnotný zážitek z příjmu kvalitních zvukových signálů divadelního představení nebo koncertu. Instalaci přiměřeného indukčního smyčkového zesilovacího systému lze pokrýt prostory různé velikosti a různých tvarů: od několika čtverečních metrů okolo pracovního stolu, až po sportovní haly.[1]

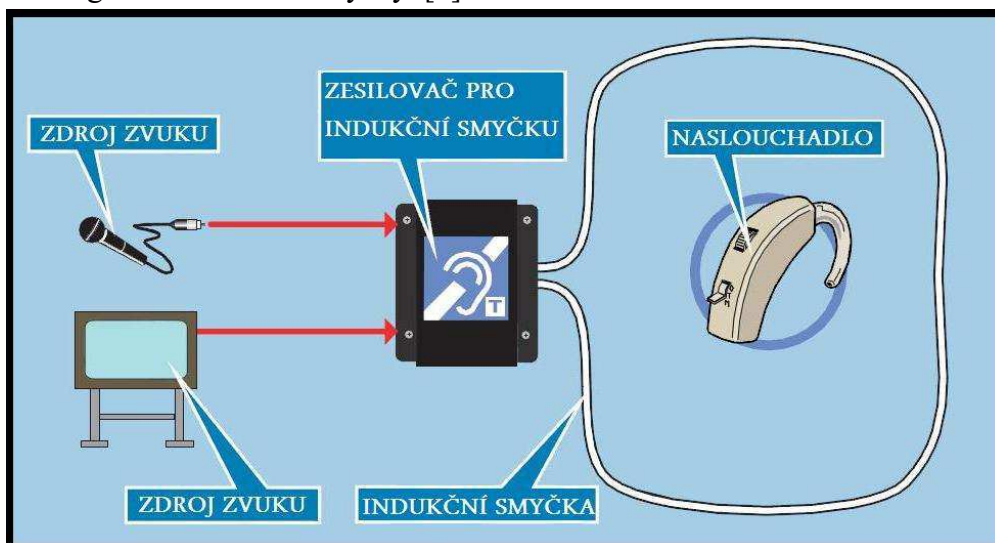
Prostory vybavené indukčním smyčkovým zesilovacím systémem jsou označeny mezinárodně přijatým grafickým symbolem (Obr. 1).



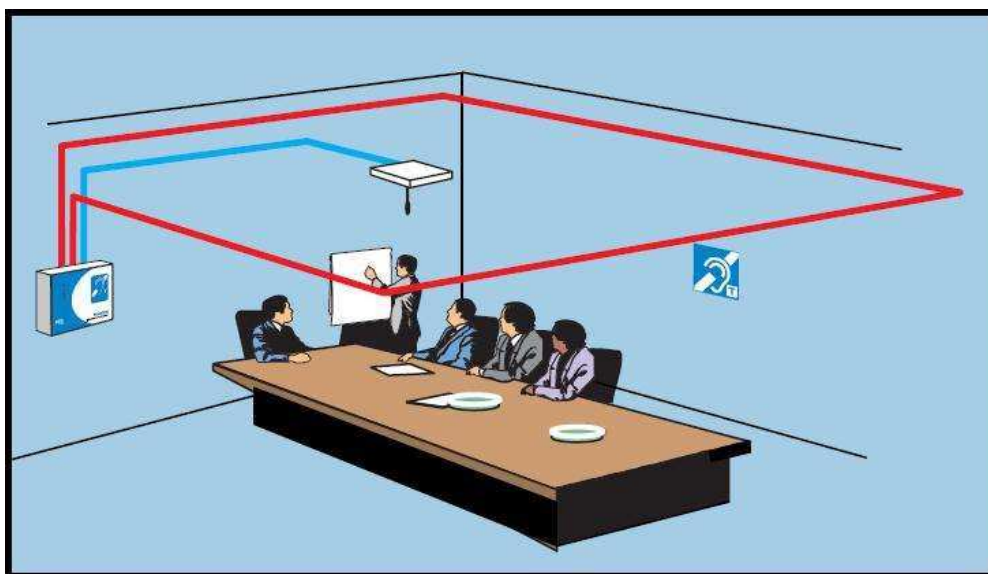
Obr. 1: Mezinárodně přijatý grafický symbol označující prostory vybavené indukční smyčkou  
[1]

Systém s audio indukční smyčkou se skládá z následujících prvků (Obr. 2):

- zdroj zvuku - používají se zdroje zvuku jako například mikrofon, televize, rádio a podobné,
- zesilovač pro indukční smyčku,
- audio indukční smyčka – obvykle jedna, nebo dvě smyčky drátu vedené okolo místnosti (Obr. 3), nebo speciální malá smyčka upevněná na spodní straně stolu (Obr. 4),
- přijímač signálu z indukční smyčky – naslouchadlo s „T“ nebo „MT“ přepínačem, eventuálně lze použít speciálně navržené zařízení pro příjem signálu z indukční smyčky. [2]

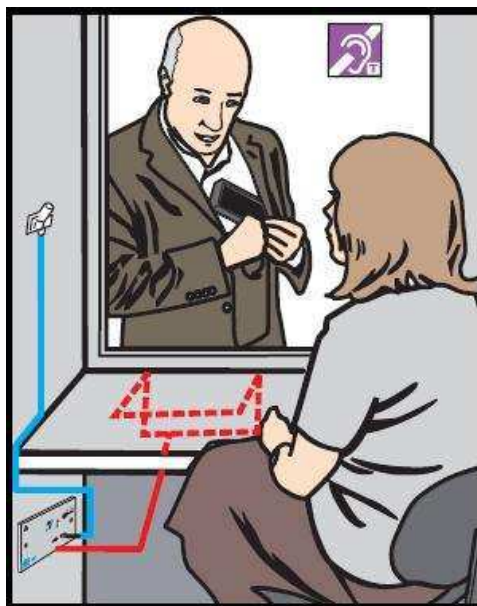


Obr. 2: Prvky systému [2]



Obr. 3: Indukční smyčka v místnosti [2]





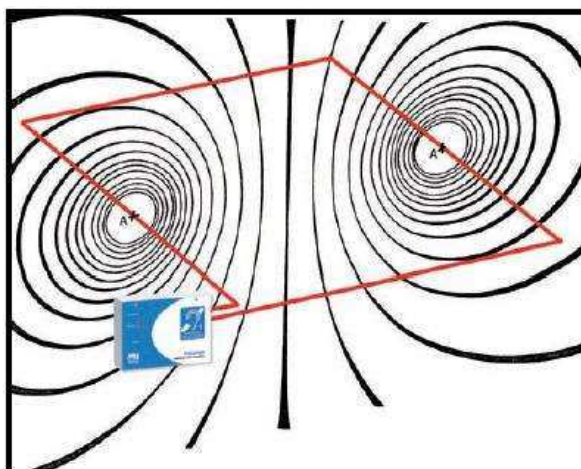
Obr. 4: Indukční smyčka pod deskou stolu [2]

## 2.1 Funkce systému s indukční smyčkou

Systém s audio indukční smyčkou nepoužívá radiové frekvence, ale pracuje na běžných audio frekvencích.

Signál z audio zdroje je veden do zesilovače pro indukční smyčku, který jej zesílí na potřebnou úroveň. Zásadní rozdíl je v tom, že zesílený signál není buzen do reproduktoru, jako je tomu u audio zesilovače, ale do uzavřené indukční smyčky umístěné v místě, které má být signálem pokryto.

Proud procházející smyčkou vytváří magnetické pole, které je vyzařováno do prostoru okolo indukčního vodiče (Obr. 5). Magnetické pole procházející cívkou v přijímači, jako je naslouchadlo, generuje proud, který je převáděn zpět na audiosignál, který je uživateli srozumitelný.[2]



Obr. 5: Magnetické pole v rovině jedné osy čtvercové smyčky [2]

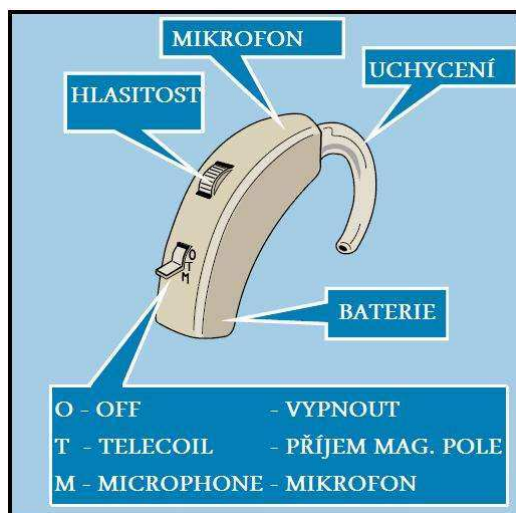
### 3 NASLOUCHADLA

Naslouchadlo (Obr. 6) je malý elektroakustický přístroj, sloužící ke zlepšení sluchu při částečné hluchotě zesilováním a modulací zvuku přicházejícího z okolního prostředí. Jeho historickým předchůdcem byla čistě akustická naslouchadla, která měla podobu jednoduché obrácené trumpety a zvuk zesilovala pasivně. [3]

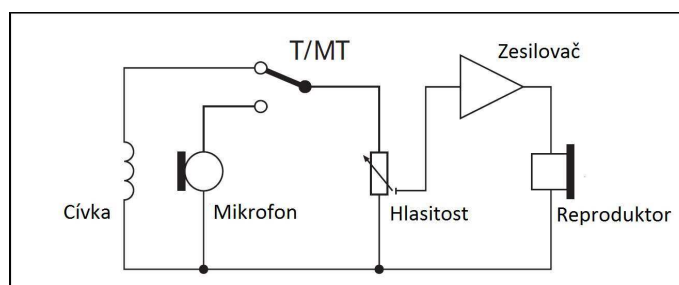
V běžné komunikaci se používá naslouchadlo v režimu „M“ - mikrofon, který přijímá okolní zvuk. Tento režim je účinný v tichém prostředí. Například pro poslech hudby z větší dálky, nebo u přepážek je naslouchadlo méně efektivní. Mikrofon zachycuje jakýkoliv šum v pozadí, který může mít nepříznivý účinek na srozumitelnost vyžadovaného zvuku.

Pro příjem signálu z magnetického pole, tedy i z indukční smyčky je zapotřebí aktivovat vnitřní cívku přepnutím přepínače na polohu „T“. Vzhledem k tomu, že většina naslouchadel je standardně vybavena přijímací cívkou (více než 90 %), lze považovat tenhle systém za nákladově efektivnější, než ostatní systémy. Blokové schéma je znázorněno na obrázku 7.

Moderní naslouchadla nezesilují rovnoměrně v celém frekvenčním pásmu. Jsou přizpůsobena tak, aby různé frekvence zesilovala s různým ziskem a tím více vyhověla uživatelskému požadavku. Díky tomu lze dosáhnout větší srozumitelnosti přijatého signálu. [2]



Obr. 6: Naslouchadlo [2]



Obr. 7: Blokové schéma naslouchadla [5]

## 4 VODIČE PRO AUDIO INDUKČNÍ SMYČKU

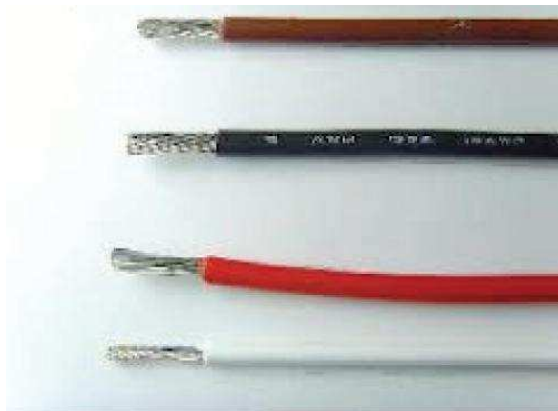
Existuje mnoho typů vodičů vhodných pro konstrukci systému s indukční smyčkou. Zesilovače pro indukční smyčku mají doporučené zatížení na výstupu, což je stejnosměrný odpor, nebo impedance připojeného vodiče. Pokud má zesilovač doporučené zatížení  $0,5 \Omega$  až  $1 \Omega$ , musí mít připojenou smyčku, která splňuje tuhle specifikaci. Pro dosažení menšího odporu smyčky lze použít vodič s větším průřezem. Naopak pro dosažení většího odporu vodiče na výstupu, lze průřez drátu zmenšit s ohledem na maximální proudové zatížení drátu, popřípadě lze instalovat smyčku s dvěma závity. Kromě většího odporu na výstupu dosáhneme taky větší intenzity magnetického pole, ale nastane útlum pro vyšší kmitočty.

### 4.1 Příklady vodičů pro konstrukci smyčky:

V následujících čtyřech podkapitolách jsou uvedeny příklady běžně používaných vodičů pro vytvoření indukční smyčky.

#### 4.1.1 Samostatný vodič:

Nejpoužívanější typ vodiče. Lze jej jednoduše sehnat od mnoha dodavatelů v různých barvách a průřezech (Obr. 8).



Obr. 8: Samostatný vodič [4]

#### 4.1.2 Plochý pásek:

Plochý vodič má o 10 – 20 % menší indukčnost. Díky tomu může být delší než obyčejný vodič a bude splňovat požadavky na zatížení. Využívá se zejména k instalaci na podlahu (pod koberec), nebo je možnost jej přilepit na stěnu (Obr. 9).



Obr. 9: Plochý pásek [4]

#### 4.1.3 Úložný kabel:

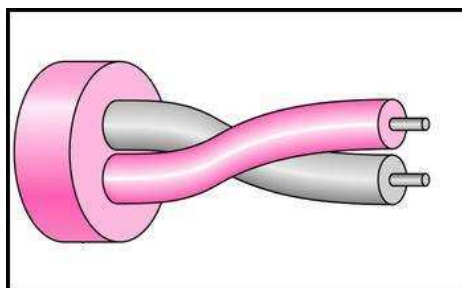
Jedná se o kabel se zvýšenými nároky na odolnost izolace. Používá se například do betonu, pod omítku, do země, odolává plísni, zabraňuje šíření plamene atd. (Obr. 10).



Obr. 10: Úložný kabel [4]

#### 4.1.4 Kroucená dvojlinka:

Nejedná se přímo o kabel k vytvoření indukční smyčky, ale o propojovací kabel. Ve většině případů nelze zesilovač umístit přímo k indukční smyčce. Pokud bude potřeba indukční smyčku umístit například ke stropu a zesilovač na jiné místo, k propojení periférií použijeme právě kroucenou dvoulinku. Kroucením eliminujeme šíření magnetického pole nežádoucím směrem. Umístění zesilovače by mělo však být co nejblíže k indukční smyčce. Odpor tohoto vodiče je nutné započítat do celkového odporu zatížení zesilovače (Obr. 11). [4]



Obr. 11: Kroucená dvojlinka [4]

## 5 NÁVRH SMYČKY

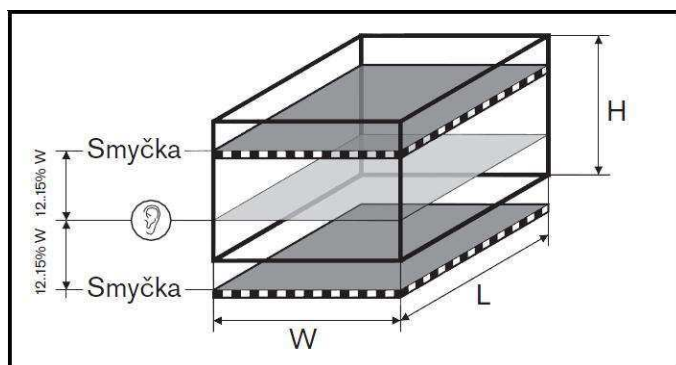
Pro kvalitní pokrytí prostoru signálem z indukční smyčky existuje několik variant konstrukce smyčky. V níže uvedených kapitolách je popsáno několik z nich.

### 5.1 Umístění smyčky

Pro nejvyšší možnou kvalitu zvuku a nejmenší kolísání intenzity magnetického pole musí být vzdálenost mezi indukční smyčkou a poslechovou rovinou mezi 12 % a 15 % šířky místnosti (Obr. 12).

Je-li tedy místnost široká ( $W$ ) například 10 m, měla by být indukční smyčka nainstalovaná ve výšce 0 až 0,4 m pod podlahou nebo 2,4 až 2,8 m nad ní – dosáhne se tak maximální kvality zvuku a nejmenšího kolísání intenzity magnetického pole.

Pokud je indukční smyčka příliš blízko podlahy (blíže než 8 % šířky místnosti) nebo naopak příliš daleko (více než 20 % šířky místnosti) je zapotřebí navýšení výkonu, který musí zesilovač do smyčky dodat, aby vzniklo magnetické pole s dostatečnou intenzitou.[5]



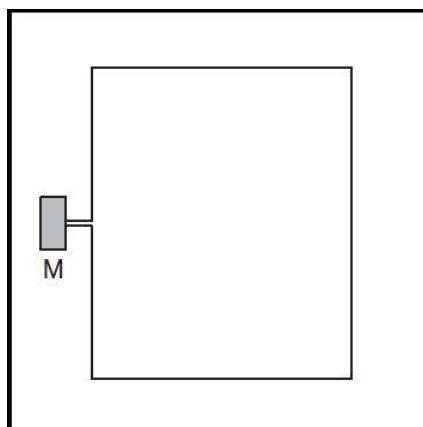
Obr. 12: Umístění smyčky [5]

### 5.2 Systémy smyčky

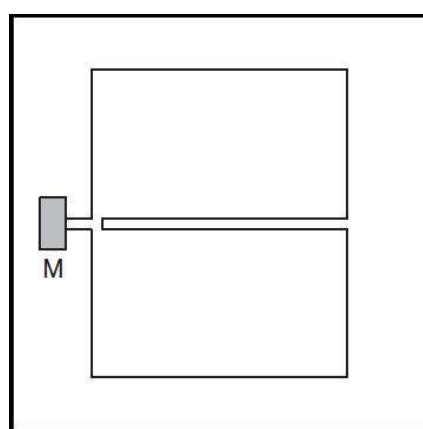
Pro konstrukci indukční smyčky lze využít několik typů systémů:

#### 5.2.1 Jednoduchý systém:

Systém se skládá z jednoho hlavního zesilovače a jedné (Obr. 13), nebo několika smyček (Obr. 14).



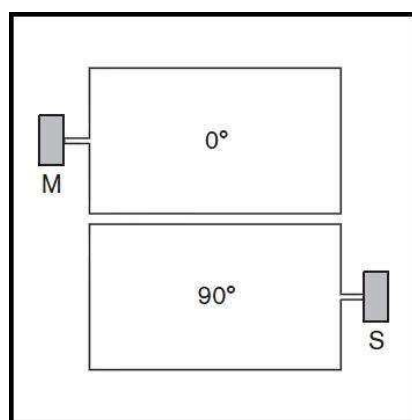
Obr. 13: Jednoduchý systém s jednou smyčkou [5]



Obr. 14: Jednoduchý systém s dvojitou smyčkou [5]

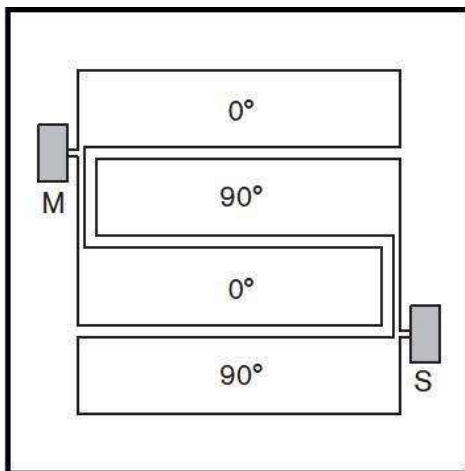
### 5.2.2 Kvadrurní systém

Tento systém zapojení obsahuje hlavní (Master) zesilovač pro indukční smyčku  $M$  a podřízený (Slave) zesilovač pro indukční smyčku  $S$ . Aby nedocházelo ke vzájemnému rušení, musí být fáze signálu těchto zesilovačů navzájem posunuta o  $90^\circ$  (Obr. 15).



Obr. 15: Jednoduchý systém, jedna smyčka na zesilovač [5]

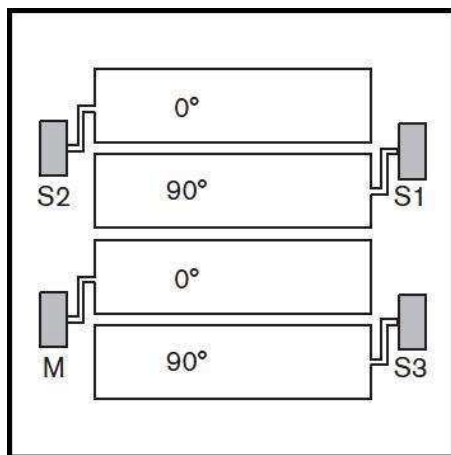
Jednoduchý systém s více smyčkami na jeden zesilovač slouží k pokrytí větších prostor. Všechny smyčky musejí být stejně velké (Obr. 16).



Obr. 16: Jednoduchý systém, více smyček na zesilovač [5]

### 5.2.3 Rozšířený kvadrurní systém

Pro pokrytí velmi rozsáhlých prostor slouží rozšířený kvadrurní systém (Obr. 17). Systém se skládá z hlavního (Master) zesilovače (M) s jednou nebo více indukčními smyčkami a lichého počtu (Slave) zesilovačů (S1, S2, S3 atd.) také s jednou nebo více indukčními smyčkami. Všechny smyčky musejí být stejně velké. [5]



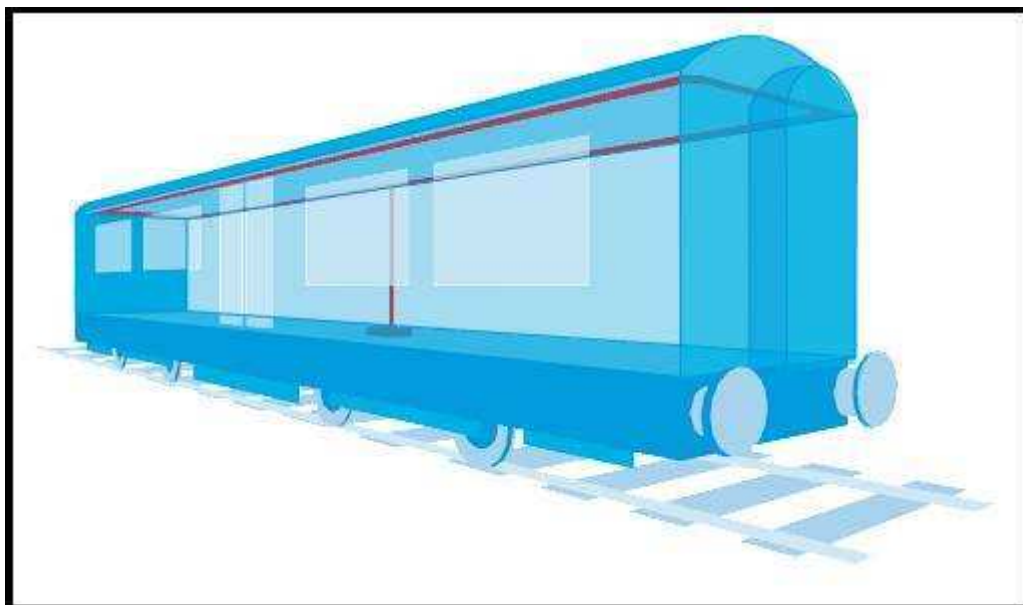
Obr. 17: Rozšířený kvadrurní systém [5]

## 6 VOZIDLO

Jako příklad vozidla, u kterého došlo v letech 2015 až 2016 k modernizaci a do kterého by se mohl instalovat systém s audio indukční smyčkou je vůz Bdpee231 (Obr. 18). Umístění indukční smyčky je znázorněno na obrázku 19 a 20. Celkové rozměry jsou znázorněny na obrázku 21.

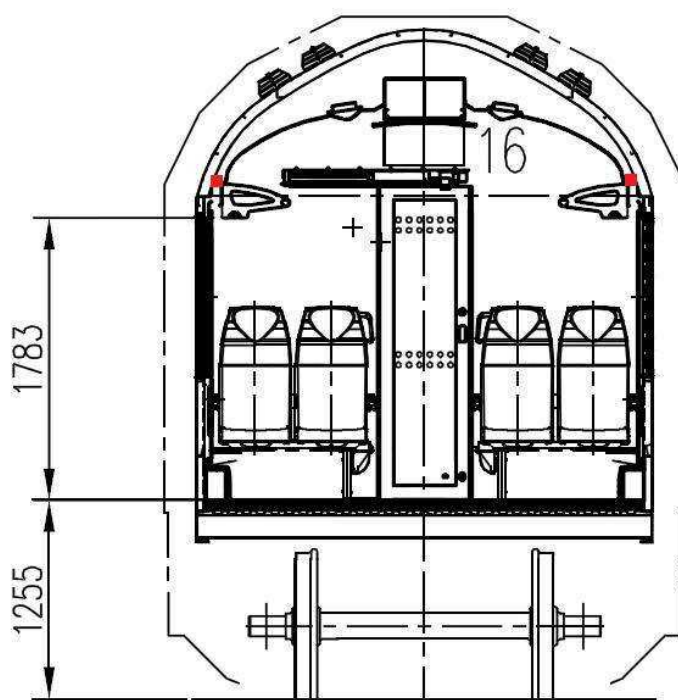


Obr. 18: Modernizovaný vůz Bdpee231

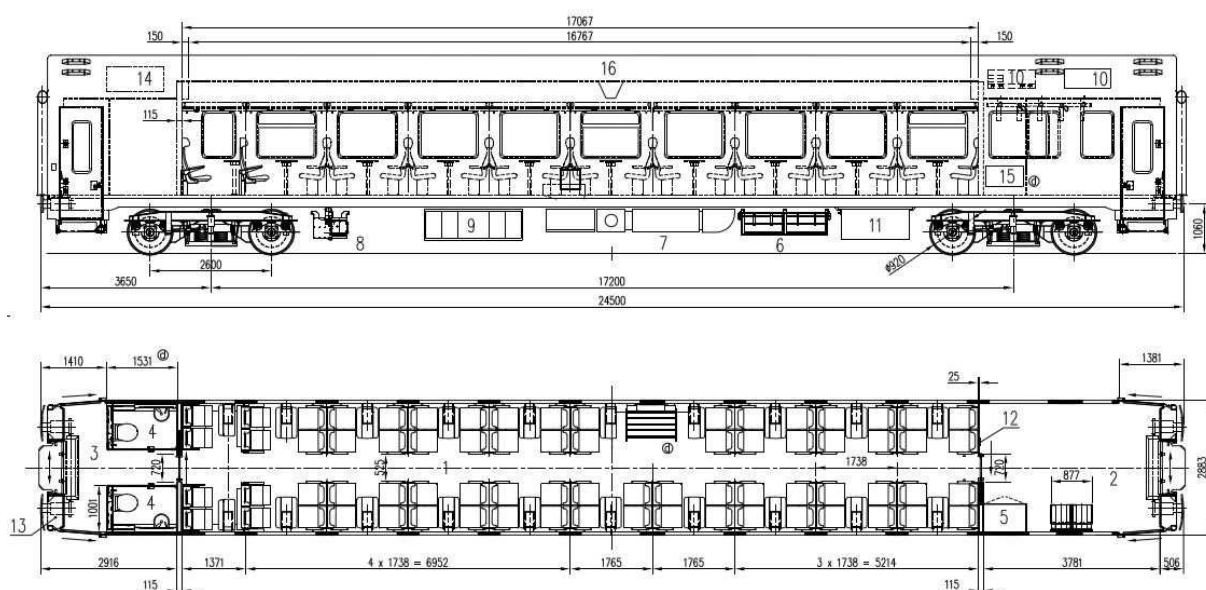


Obr. 19: Audio indukční smyčka ve vozidle [2]





Obr. 20: Náskres umístění indukční smyčky ve vozidle



Obr. 21: Rozměry vozidla

Z obrázku 21 lze odečíst rozměry prostoru pro cestující a z toho dopočítat délku smyčky:

$$l = 2 * (w + l) = 2 * (17 + 2,7) \doteq 40 \text{ m}, \quad (1)$$

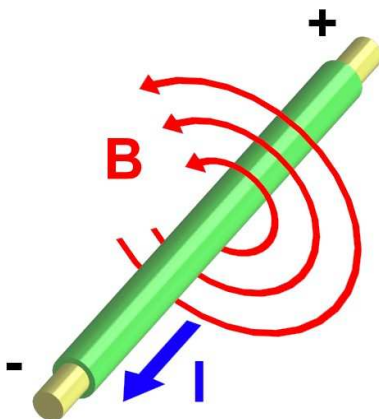
kde  $w$  je šířka vozidla a  $l$  je délka vozidla.

## 7 MAGNETICKÉ POLE

Magnetické pole je fyzikální pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj (tedy elektrický proud). Magnetické pole lze tedy pozorovat kolem elektrických vodičů, kde je zdrojem volný elektrický proud, ale také kolem tzv. permanentních magnetů, kde jsou zdrojem pole vázané elektrické proudy. Magnetické pole může být také vyvoláno změnami elektrického pole.[6]

### 7.1 Magnetické indukční čáry

Tvar pole lze popsat magnetickými indukčními čarami (Obr. 22). Jsou to uzavřené neprotínající se orientované křivky, jejichž tečna v daném bodě má směr vektoru magnetické indukce a jejichž hustota (počet čar procházejících skrz jednotkový kolmý element plochy) je úměrná velikosti vektoru magnetické indukce. Volně otáčivá úzká magnetka či cívka protékaná elektrickým proudem vložená do pole se tedy ustálí tak, že její osa bude tečnou k indukčním čarám magnetického pole v tomto bodě.[6]



Obr. 22: Magnetické indukční čáry okolo vodiče [6]

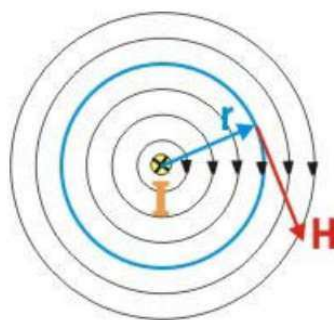
### 7.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole se označuje  $H$  a její jednotka je v ampérech na metr (A/m). Je to vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (velikost elektrického proudu, tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.[7]

Síločáry magnetického pole kolem přímého vodiče mají tvar kružnice (Obr. 23), takže délka síločáry ve vzdálenosti  $a$  od vodiče je  $l=2\cdot\pi\cdot r$ . Intenzitu magnetického pole pak dopočítáme z následujícího vztahu[8]

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad (2)$$

kde  $I$  je proud procházející vodičem a  $a$  je vzdálenost od vodiče.



Obr. 23: Intenzita magnetického pole H v závislosti od vodiče [8]

### 7.2.1 Intenzita magnetického pole v obdélníkové smyčce

Intenzitu magnetického pole uprostřed obdélníkové smyčky (Obr. 24) lze spočítat pomocí následujícího vzorce (3): [9]

$$B_0 = 2 * \frac{\mu_0 * I}{4\pi} * 2 \left( \frac{\sin \alpha}{a} + \frac{\sin \beta}{b} \right) \quad (3)$$

Kde:

$\mu_0$ : permeabilita vakua =  $4\pi * 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 1,2566 * 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$ ,

I: proud procházející smyčkou,

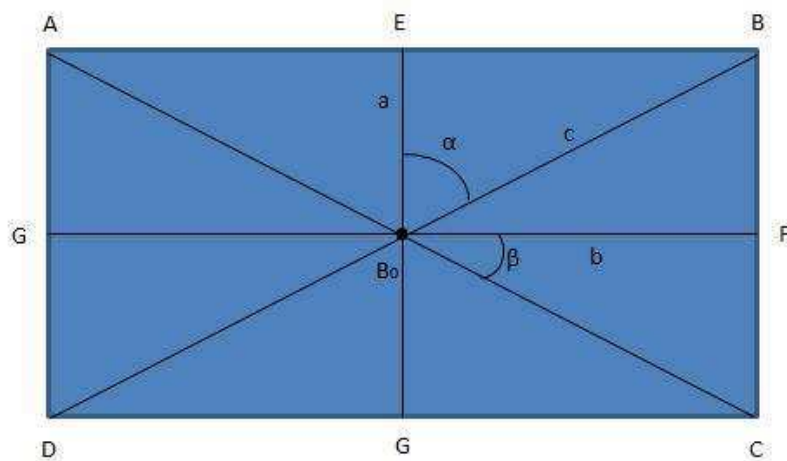
a:  $\frac{1}{2}$  strany AD (vyznačeno na obrázku 23),

b:  $\frac{1}{2}$  strany AB (vyznačeno na obrázku 23),

$c = \sqrt{a^2 + b^2}$ ,

$\sin \alpha = \frac{b}{c}$ ,

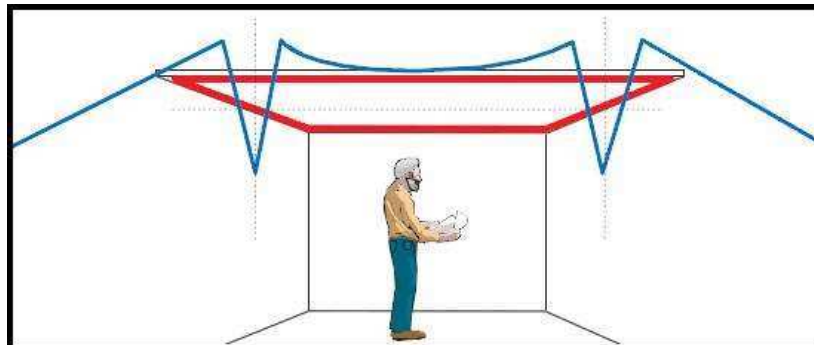
$\sin \beta = \frac{a}{c}$ .



Obr. 24: Obdélníková smyčka

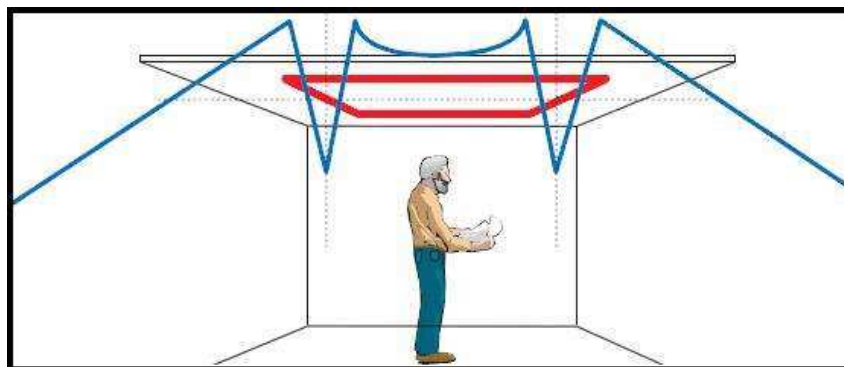
### 7.3 Šíření magnetického pole

V následujícím obrázku (Obr. 25) je vidět, jak se šíří magnetické pole kolem vodiče. Pokrytí není jen v požadované místnosti, ale šíří se i mimo místnost.



Obr. 25: Šíření magnetického pole mimo místnost [2]

Jeden ze způsobů redukce vyzařování je, že smyčka se neumísť přímo po obvodu celé místnosti, ale její velikost se úměrně zredukuje (Obr. 26). Díky tomu ale vznikne v místnosti takzvané „mrtvé místo“ a je možné, že posluchač nacházející se v něm nebude nic slyšet. Je to tím, že přijímače reagují pouze na vertikální složku magnetického pole. Pro vytvoření smyčky je zapotřebí zvolit vhodnou alternativu mezi vyzařováním a „mrtvým místem“ v požadovaném prostoru. Většinou je „mrtvé místo“ velmi úzké a je často přijatelným kompromisem za snížení přesahu pokrytí signálem mimo místnost. [2]



Obr. 26: Redukce šíření magnetického pole mimo místnost [2]

## 8 INDUKČNÍ SYSTÉM PRO DRÁŽNÍ KOLEJOVÁ VOZIDLA

Užití systému s indukční smyčkou přispěje cestujícím nejen k většímu komfortu při cestování, ale také k větší bezpečnosti. Naslouchadlo v režimu „M“, tedy mikrofon, může přijímat akustický signál z vlakového rozhlasu, ale při zvýšeném hluku ve vlaku, například v tunelu nebo řeči okolních cestujících, bude požadovaný signál rušený a nebude srozumitelný. Užitím systému s audio indukční smyčkou bude mít uživatel jistotu kvality signálu. Použití bude nejen pro ohlašování stanic cestujícím na neznámé trase, ale také pro nouzová hlášení, servisní hlášení, či důležitých informací od obsluhy vlaku.

### 8.1 Umístění smyčky

Dle normy ČSN EN 60118-4 je výška stojící osoby 1,7 m a sedící osoby 1,2 m.[10] Nejčastější umístění smyčky je kolem horní části stěn, typicky od 1,8 m do 2 m nad úrovní podlahy. Obvykle 0,3 m pod střechou vlaku kvůli redukci ztrát v kovu. Nejlepší umístění záleží na konstrukci vozidla. Je dobré pokrýt celý vagon, aby si uživatelé naslouchadlem nemuseli vybírat pouze určitá místa ve vagonu (Obr. 27).

Výpočet umístění audio indukční smyčky dle předchozích informací:

šířka vlaku:  $w = 2,7 \text{ m}$ ,

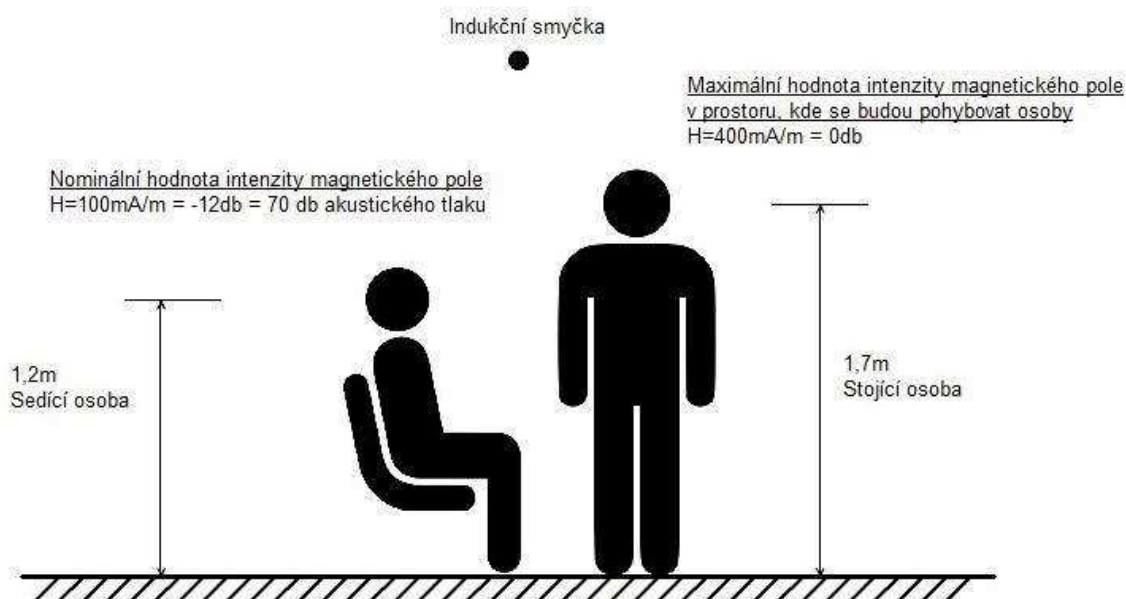
výška stojící osoby:  $V_1 = 1,7 \text{ m}$ ,

výška sedící osoby:  $V_2 = 1,2 \text{ m}$ ,

výška umístění smyčky: výška uživatele + 12 % z šířky místnosti (prostoru).

$$\text{Pro stojící: } V_{stoj} = V_1 + \frac{w}{100} * 12 = 1,7 + \frac{2,7}{100} * 12 = 2,05m. \quad (4)$$

$$\text{Pro sedící: } V_{sed} = V_2 + \frac{w}{100} * 12 = 1,2 + \frac{2,7}{100} * 12 = 1,6m. \quad (5)$$



Obr. 27: Pokrytí vagonu magnetickým polem

Výpočet pro umístění smyčky je pouze orientační. Smyčka se musí nacházet v dostatečné vzdálenosti nad přijímačem, nebo pod přijímačem posluchače. V montáži ve vagonu, bude výška umístění smyčky omezena konstrukčními možnostmi vagonu a zároveň nesmí překážet ostatním periferiím.

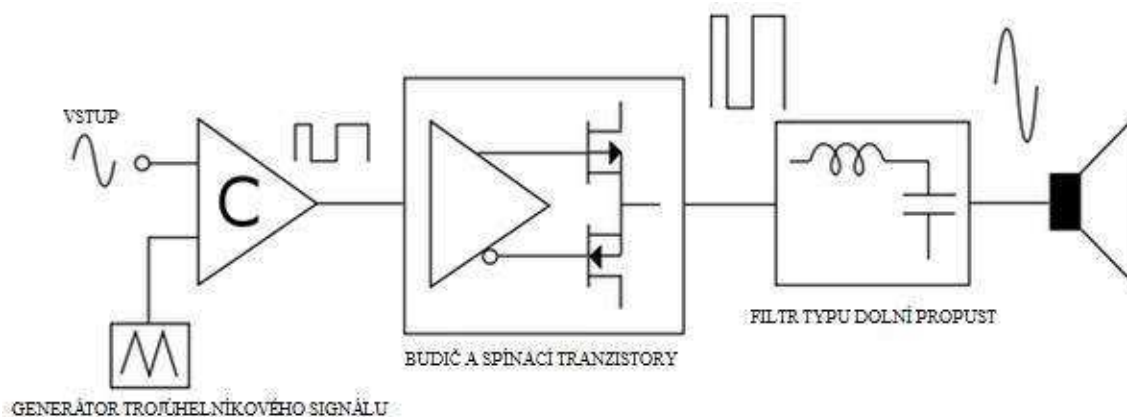
Dle výpočtu (vzorec 5) je vhodné umístit smyčku 1,6 m nad podlahou vozu. Z konstrukčního řešení vozidla ale vyplývá, že umístění smyčky bude tak, jak je znázorněno červenými body na obrázku 24. Vodiče nelze umístit do stěn vozidla, kde jsou i okna. Je potřeba vybrat vhodnou polohu vodiče mezi vnějším krytem vagonu a vnitřním stropem.

## 8.2 Ztráty v železe

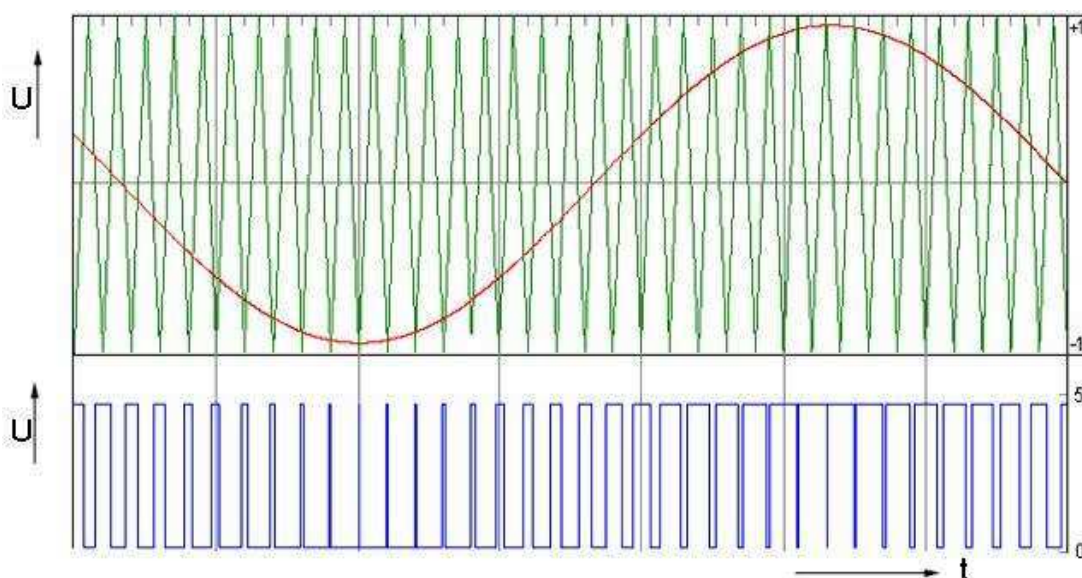
Celá karoserie vagonu je konstruována ze železa – kovové panely s rámy a konstrukčními podpěrami, podlaha, stěny atd. Přestože interiér může být konstruován z nekovových částí, indukční smyčka uvnitř takového vozidla vykazuje velmi vysoké ztráty vysílané energie a změnu frekvenční odezvy. Kovová ztráta se vždy v jednotlivých typech vagonů liší, protože každý vagon má jinou konstrukci. Jediným způsobem, jak určit tyto ztráty je měřením magnetického pole v každém typu vagonu.

## 9 AUDIO ZESILOVAČ PRACUJÍCÍ VE TŘÍDĚ D

Zesilovače v třídě D pracují v pulsním režimu. Komparátor porovnává vstupní signál s trojúhelníkovým průběhem napětí řádově vyšší frekvence, než je maximální frekvence vstupního signálu (Obr. 29). Zjednodušený princip je znázorněn na obrázku 28. Velmi rychle dochází k přepínání výstupu mezi oběma polaritami napájení. Střední hodnota výstupního signálu reprezentuje zesílený vstupní signál. Pro získání výstupního signálu stačí na výstup komparátoru zařadit filtr typu dolní propust. Hlavní výhodou celé konstrukce je účinnost, která často přesahuje 90%, neboť výstupní tranzistory jsou během své činnosti buď zcela sepnuty, nebo rozepnuty. Tímto jsou vyloučeny situace, kdy tranzistor vede pouze částečně a při poměrně velkém proudu na něm vzniká velký úbytek napětí, takže se velké množství energie mění v teplo. [11]



Obr. 28: Zjednodušené zapojení zesilovače třídy D [11]



Obr. 29: Zobrazení průběhů napětí na vstupech a na výstupu komparátoru [11]

## 9.1 Koncové tranzistory

Jako koncové tranzistory se nabízejí 2 typy a to IGBT a MOSFET. Nejrozšířenější jsou tranzistory MOSFET, které mají malé spínací časy a malé ztráty. Velkou výhodou je i napět'ové řízení těchto tranzistorů. IGBT tranzistory byly dříve značně pomalé, ale v poslední době se jejich parametry zlepšily natolik, že je možnost použít i tenhle typ tranzistorů.

## 9.2 Výstupní filtr

Výstupním filtrem a vhodně zvolenými komponenty pro jeho optimální realizaci je v nezanedbatelné míře ovlivněna účinnost vlastního systému zesilovače spolu s audio parametry tohoto zesilovače. Zde jsou uvedeny příklady tří používaných topologií výstupních filtrů spínaných zesilovačů pracujících ve třídě D:

- feristor a kondenzátor,
- výstup zesilovače není opatřen výstupním filtrem,
- filtr typu dolní propust, který je tvořen prvky cívka - kondenzátor (tzv. LC filtr).

Volba výstupního filtru zesilovače je převážně závislá na délce spojovacího vodiče mezi zesilovačem a reproduktorem (resp. reproduktorovou soustavou), dále na výstupním výkonu zesilovače, použité modulaci a rozložení součástek na desce plošného spoje. Spínané zesilovače, u kterých se výstupní výkony pohybují v řádech nad několik desítek wattů, jsou na svém výstupu prakticky výhradně opatřeny LC filtrem typu dolní propust. Zásadní nevýhodou tohoto typu výstupního filtru je navýšení ceny a rozměrů finálního zesilovače. Proto je dnes bohužel takřka společným rysem všech komerčně vyráběných spínaných zesilovačů pracujících ve třídě D silně poddimenzovaný výstupní filtr. [12]



## 10 TRANSFORMÁTOR

Transformátor (Obr. 30) je elektrický netočivý stroj umožňující přeměnu střídavého napětí. Princip jeho funkce vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce, který říká, že napětí indukované ve smyčce je přímo úměrné změně magnetického toku. V případě transformátoru dochází k indukci napětí v sekundárním vinutí vlivem působení proměnlivého magnetického toku, jenž je vyvoláván proudem procházejícím primárním vinutím.

Zvyšování elektrického napětí se využívá zejména pro účely přenosu a distribuce elektrické energie, protože zvýšení napětí vyvolá, při zachování stejného výkonu, snížení proudu a pokles Joulových ztrát. Naopak snižování napětí bývá využíváno pro potřeby rozvodu a napájení elektrických přístrojů.[13]

### 10.1 Vinutí

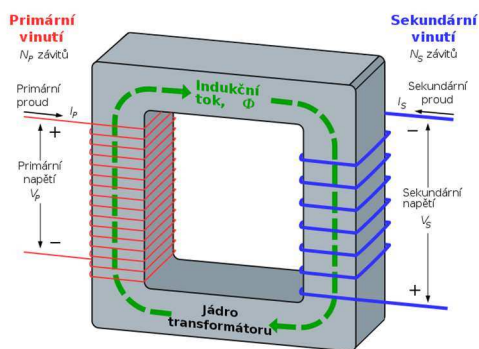
Každá fáze transformátoru je tvořena vinutím primárním a sekundárním (některé transformátory mohou mít sekundárních vinutí i více). V závislosti od konfigurace můžeme vinutí rozdělit na dva základní typy – desková a válcová.

Deskové vinutí se skládá ze střídajících se kotoučů cívek primárního a sekundárního vinutí. V případě vinutí válcového jsou cívky navinuty po celé délce jádra, přičemž je na jádře navinutá cívka jedna a ní pak druhá.

Počet závitů na primární a sekundární cívce, respektive jejich poměr, udává převod transformátoru, který lze vypočítat ze vztahu

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (6)$$

kde  $N_1$  udává počet závitů na primárním vinutí,  $N_2$  udává počet závitů na sekundárním vinutí,  $U_1$  je napětí na primárním vinutí,  $U_2$  je napětí na sekundárním vinutí,  $I_1$  je proud v primárním vinutí a  $I_2$  je proud v sekundárním vinutí. [13]



Obr. 30: Transformátor [13]

## 11 ALTERNATIVA INDUKČNÍ SMYČKY

Jako možnou alternativu indukční smyčky lze použít systém s komunikací pomocí infračerveného záření. Tento druh systému nevyzařuje do okolí magnetické pole, jako tomu je u indukční smyčky, ale vyzařuje světlo v neviditelném, infračerveném spektru, které zpracovává přijímač. Na obrázku 31 je grafický symbol, který označuje prostory vybavené tímto systémem.

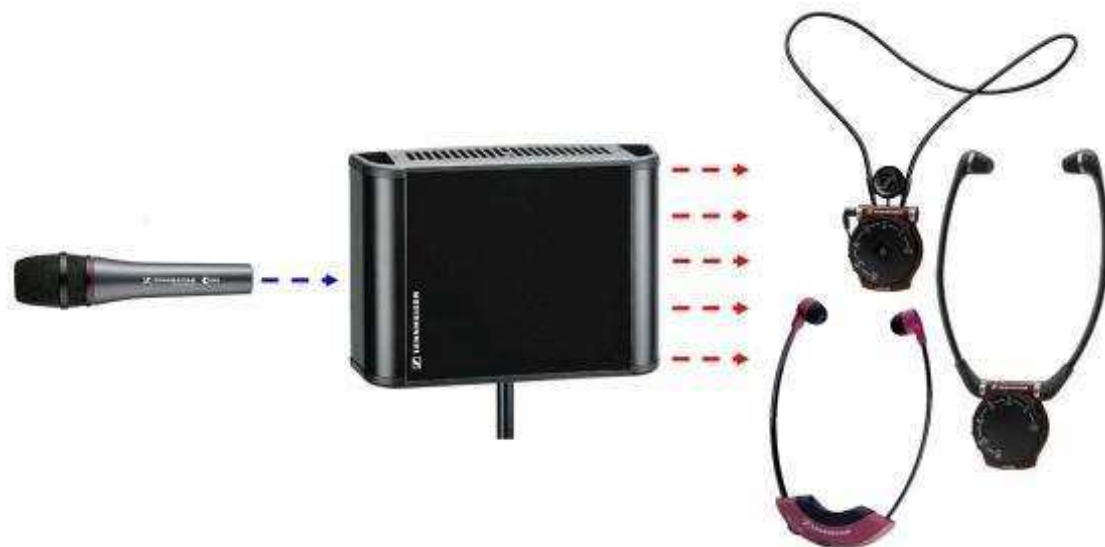


Obr. 31: Grafický symbol označující prostory vybavené infračerveným systémem [14]

### 11.1 Popis funkce

Stejně jako je tomu u systému s audio indukční smyčkou, vysílač musí mít nějaký zdroj signálu, například z mikrofону, nebo nějakého jiného audio zdroje, který produkuje audio informaci. Tuto informaci vysílač zpracovává a pomocí infračervených diod jej vysílá do okolí (Obr. 32). Přijímací zařízení přijme informaci z infračerveného záření

a převede jej uživateli zpět na elektrický signál a následně na audiosignál. U tohoto systému není žádný limit uživatelů, kteří budou přijímat signál z jednoho vysílače. [14]



Obr. 32: Specifické zapojení infračerveného systému [14]

Výhody:

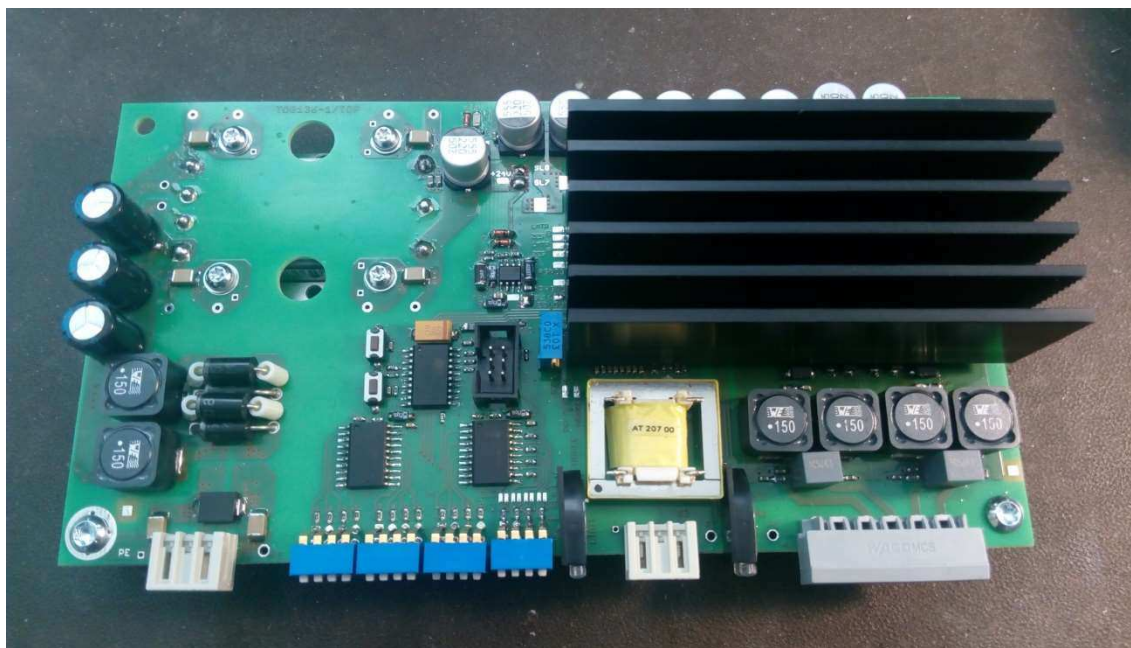
- infračervené světlo se nešíří přes stěny místností,
- absence vodiče okolo místnosti, jednodušší instalace,
- nevznikají ztráty v kovových prostorách (vlaky, autobusy...),
- rychlejší přenos.

Nevýhody:

- přímá viditelnost mezi přijímačem a vysílačem,
- limitovaná vzdálenost přijímače od vysílače,
- uživatel musí mít speciální přijímací zařízení, které se používá pouze pro tenhle systém.

## 12 ZESILOVAČ PRO INDUKČNÍ SMYČKU

Pro stavbu zesilovače bylo zapotřebí dodržet několik zásad z norem, které jsou vypsány níže. Dále je v těchto kapitolách podrobně rozepsáno, z jakých komponent byl zesilovač zhotoven a jakou mají v zesilovači funkci. Hotová elektronika pro zesilovač je na obrázku 33.



Obr. 33: Elektronika zesilovače pro indukční smyčku

### 12.1 Požadavky norem

Pro stavbu zesilovače pro indukční smyčku bylo zapotřebí dodržet několik důležitých parametrů.

#### 12.1.1 Požadavky na provozní teplotu

Pro možnost používání zařízení ve veřejných dopravních je zapotřebí dodržovat pravidla předepsaných norem. Zařízení musí pracovat při teplotách od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 12.1.2 Požadavky na vstupní napětí

Další požadavek je provoz zařízení při dodržení rozsahu velikosti napájecího napětí. V drážních vozidlech se používá napájení v úrovních 24 V, 48 V, 72 V, 96 V, 110 V. Zařízení pracující při stanoveném napájecím napětí  $U_n$  musí ale dodržovat i odchylku od nominální hodnoty. Minimální napětí, při kterém musí zařízení pracovat je  $0,7 * U_n$  a maximální napětí je  $1,25 * U_n$ . [15]

### 12.1.3 Požadavky na magnetické pole

Další důležitou informací je dodržení maximální intenzity magnetického pole uvnitř indukční smyčky a přenosové frekvenční pásmo. To je stanoveno v rozsahu 100 Hz až 5 kHz, s tolerancí  $\pm 3$  dB od nominální hodnoty měřené při 1 kHz.

Dle normy ČSN EN 60118-4 nesmí být překročena intenzita magnetického pole  $H = 400$  mA/m v prostoru, kde je možnost pohybu osob.[10] Hodnotu magnetické indukce  $B$  je možná dopočítat z následujícího vzorce:

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad (7)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita prostředí, ve kterém se nachází magnetické pole a  $H$  je intenzita magnetického pole.

Hodnota magnetické indukce  $B$  při  $H = 400$  mA/m byla vypočítána jako

$$B = 4\pi * 10^{-7} * 1 * 0,4 \frac{A}{m} = 0,5026 \mu T. \quad (8)$$

Optimální hodnota intenzity magnetického pole je  $H = 100$  mA/m, což odpovídá -12 dB od hodnoty 400 mA/m. Tato hodnota je srovnatelná s úrovní 70 dB akustického tlaku.[10]

Intenzita magnetické indukce  $B$  při nominální hodnotě  $H = 100$  mA/m byla dopočítána z následujícího vzorce:

$$B = 4\pi * 10^{-7} * 1 * 0,1 A/m = 0,1257 \mu T. \quad (9)$$

## 12.2 Výkon zesilovače

V následujících dvou kapitolách je pojednáno o teoretickém a praktickém výkonu zesilovače. Bylo zapotřebí pokrýt velkou obdélníkovou plochu v kovovém vagonu.

### 12.2.1 Teoretické odhadnutí výkonu:

Z důvodu proudového (výkonového) dimenzování zesilovače, bylo zapotřebí vypočítat teoretickou hodnotu proudu procházející smyčkou. Ze vzorce (3) pro výpočet intenzity magnetického pole uprostřed obdélníkové smyčky byl vyjádřen a vypočítán potřebný proud. Velikost obdélníku odpovídá rozměru vozidla a intenzita magnetického pole byla stanovena na maximální hodnotu povolenou normou  $H = 400 \text{ mA/m}$ , což odpovídá  $B = 0,5026 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ .

$$a = 1,35 \text{ m}$$

$$b = 8,5 \text{ m}$$

$$c = \sqrt{1,35^2 + 8,5^2} = 8,6 \text{ m} \quad (13)$$

$$\sin\alpha = \frac{b}{c} = \frac{8,5}{8,6} = 0,988 \quad (14)$$

$$\sin\beta = \frac{a}{c} = \frac{1,5}{8,6} = 0,157$$

$$I = \frac{B \cdot 4\pi}{2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{\sin\alpha}{a} + \frac{\sin\beta}{b}\right)} = \frac{0,5026 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi}{2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,988}{1,35} + \frac{0,157}{8,5}\right)} = 1,7 \text{ A} \quad (15)$$

Pro dosažení intenzity magnetického pole  $H = 400 \text{ mA/m}$  uprostřed takovéto obdélníkové smyčky je teoreticky zapotřebí proud o velikosti 1,7 A. Jelikož se ale jedná o kovovou konstrukci vozidla, která potlačuje magnetické pole a protože cestující nebudou v ose smyčky, ale pod smyčkou, byl proud smyčky dimenzován na 8  $A_{\text{ef}}$ .

### 12.2.2 Praktický výkon zesilovače

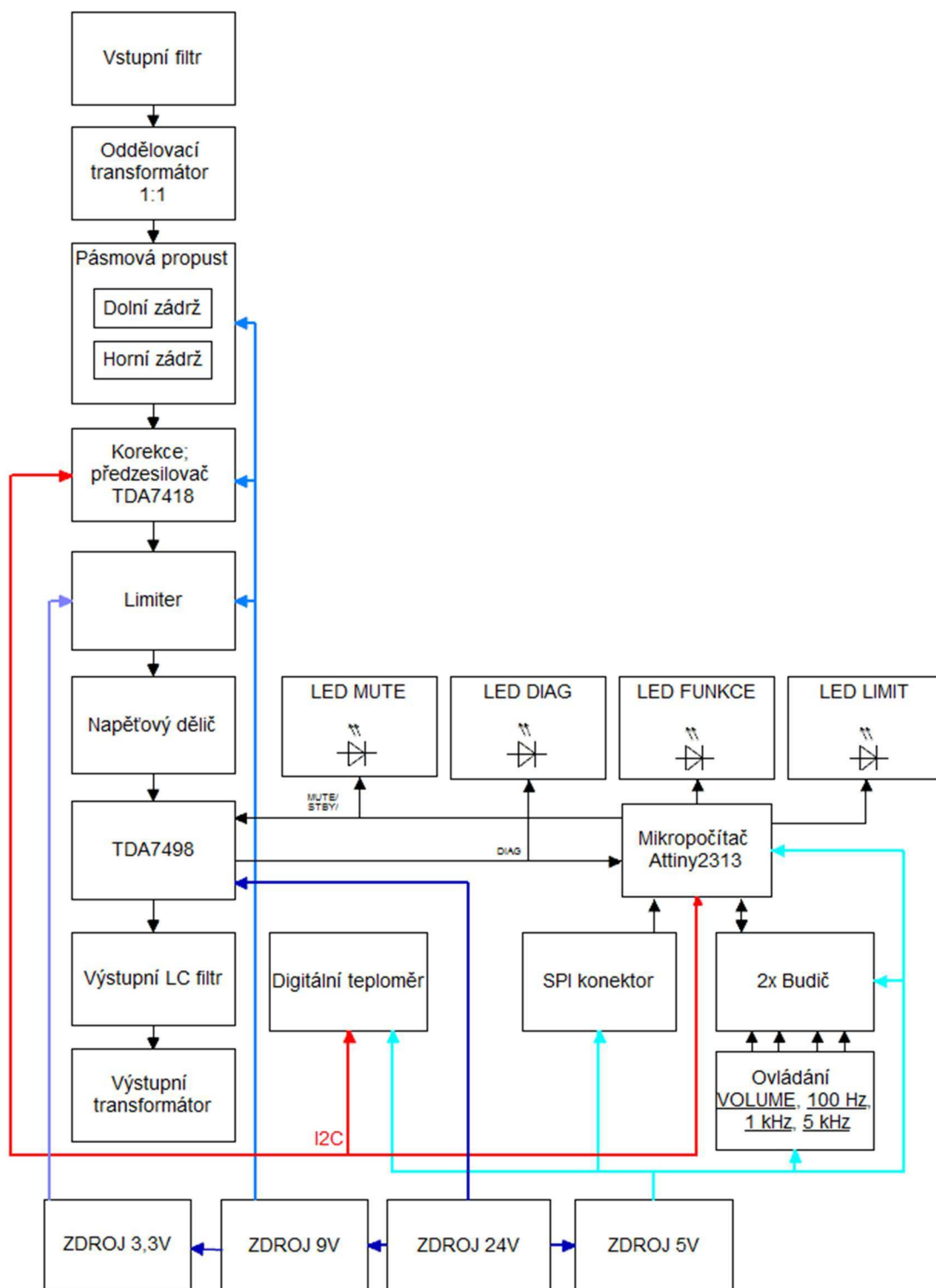
Pomocí přepínačů S1 – S4 se nastavují logické úrovně pro budiče 74HC244. Z budičů pak mikropočítač vyčítá hodnoty přepínačů a po I<sup>2</sup>C lince řídí zesílení na korekčním předzesilovači TDA7418. V tabulce 1 je uveden výkon zesilovače pro všechny možné kombinace na přepínači S1. Vstupní signál zesilovače má frekvenci  $f = 1 \text{ kHz}$  a amplitudu  $U = 0,775 \text{ V}_{\text{ef}}$ . Přepínače S2 – S4 jsou nastaveny na zesílení 0dB.

Tabulka 1: Výkon zesilovače v závislosti na nastavení přepínače S1

S1 - SETUP VOLUME				$A_u$	$U_{in}$	$U_{OUT-ZES}$	P
1	2	3	4	dB	[mV <sub>ef</sub> ]	[V <sub>ef</sub> ]	[W]
ON	ON	ON	ON	0	0,400	15	32
ON	ON	ON	OFF	-1	0,369	13,8	29,3
ON	ON	OFF	ON	-2	0,338	12,7	24,8
ON	ON	OFF	OFF	-3	0,310	11,6	20,7
ON	OFF	ON	ON	-4	0,284	10,7	17,6
ON	OFF	ON	OFF	-5	0,259	9,8	14,8
ON	OFF	OFF	ON	-6	0,237	8,97	12,4
ON	OFF	OFF	OFF	-7	0,215	8,18	10,3
OFF	ON	ON	ON	-8	0,195	7,41	8,4
OFF	ON	ON	OFF	-9	0,175	6,67	6,8
OFF	ON	OFF	ON	-10	0,156	5,97	5,5
OFF	ON	OFF	OFF	-11	0,139	5,33	4,3
OFF	OFF	ON	ON	-12	0,125	4,75	3,47
OFF	OFF	ON	OFF	-13	0,111	4,23	2,75
OFF	OFF	OFF	ON	-14	0,099	3,76	2,2
OFF	OFF	OFF	OFF	-15	0,088	3,35	1,7

### 12.3 Jednotlivé komponenty zesilovače

Zařízení bylo vyvíjené s ohledem na splnění zadání a dostupnost součástek. Je použito již několik součástek, které jsou ve firmě zavedeny, což usnadní následnou produkci. Efektivita celého zařízení je na dobré úrovni zejména díky zesilovači pracující ve třídě D s účinností větší než 90 %. Největší ztráty vznikají na výkonovém zdroji VICOR. Blokové schéma zesilovače je zobrazeno na obrázku 34.



Obr. 34: Blokové schéma zesilovače pro indukční smyčku

### 12.3.1 Vstupní filtr

První filtr se skládá ze dvou kondenzátorů 1 nF, dvou tlumivek BLM21A601F a přepětového oboustranného transilu SMBJ5.0CA, který chrání obvod před vysokým napětím. Kondenzátor s tlumivkami slouží k odfiltrování nežádoucích signálů.



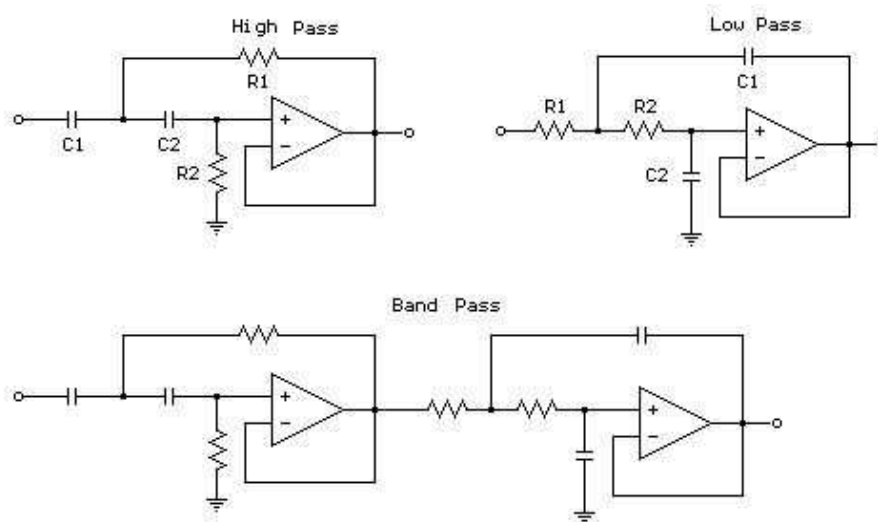
### 12.3.2 Oddělovací transformátor

Tento transformátor AT 207 00 slouží ke galvanickému oddělení vstupu zesilovače. Jeho poměr je 1:1. Nevýhoda transformátoru je malá vstupní impedance  $Z = 600 \Omega$ .

### 12.3.3 Pásmová propust

Filtr byl navržen podle Sallen-Key topologie. Frekvenční rozsah je 60 Hz - 8 kHz. Skládá se ze dvou filtrů (horní propust a dolní propust), které jsou zařazené za sebou (Obr. 35). Tato topologie má hned několik výhod. Je to jednoduchá konstrukce, má vysokou vstupní impedanci, nízkou výstupní impedanci a strmost -40 dB na dekádu. Výpočet pro oba filtry byl proveden podle stejného vzorce (16) [16]:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 * R_2 * C_1 * C_2 * 2\pi}} \quad (16)$$



Obr. 35: Filtr [16]

Horní propust:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{3900 * 15000 * 820 * 10^{-9} * 150 * 10^{-9} * 2\pi}} = 60 \text{ Hz}$$

Dolní propust:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2400 * 16000 * 6,8 * 10^{-9} * 1,5 * 10^{-9} * 2\pi}} = 8 \text{ kHz}$$

Pásmová propust je nastavena tak, aby na mezních frekvencích, podle normy, (100 Hz a 5 kHz) nedocházelo k významnému útlumu.

### 12.3.4 Korekční předzesilovač

Jako předzesilovač a korekční zesilovač zvuku byl použit audio procesor TDA7418 od firmy STMicroelectronics. Protože ve smyčce dochází k útlumu některých frekvencí, bylo zapotřebí upravovat jednotlivé pásma signálu. Tento obvod obsahuje vstupní zesilovač se zesílením +15 dB až -79 dB, třípásmový ekvalizér a výstup na subwoofer. Veškeré řízení a nastavování je prováděno pomocí I<sup>2</sup>C linky. U každého pásma je možnost výběru čtyř středových frekvencí, které mají být regulovány. Basy mají tuto frekvenci 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 200 Hz, středy 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2500 Hz a výšky 10 kHz, 12,5 kHz, 15 kHz, 17,5 kHz. Obvod je zapouzdřen v SO20. [17]

### 12.3.5 Limiter

Limiter slouží k měkkému ořezání signálu v případě, že bude z nějakého důvodu překročena jeho přípustná hodnota a mělo by docházet k přebuzení koncového zesilovače. Přípustná hodnota je nastavena pomocí odporového děliče R29 a R65. Při překračování přípustné hodnoty dojde k otevírání tranzistorů T1 a T2 (pro kladnou a zápornou půlvlnu), tím se paralelně k odporům R29+R65 přičte hodnota odporu R68 nebo R69 (kladná záporná půlvlna) a zmenší se zesílení operačního zesilovače IO5B.

### 12.3.6 Koncový stupeň

Jako koncový stupeň byl použit zesilovač TDA7498, který je od firmy STMicroelectronics (Obr. 36). Je to dvoukanálový zesilovač 100 W + 100 W do zátěže 6  $\Omega$  při napájecím napětí 36 V. Pracuje ve třídě D s velmi vysokou účinností. Důvod použití tohoto zesilovače je dostačující výkon, splnění podmínky pro provoz v teplotách -45°C až 85°C, dostupnost a jednoduchost zapojení.

Piny DIAG a MUTE/STBY/ byly propojeny s mikropočítačem Attiny2313A. Pin DIAG indikuje závadu (přehřátí, velké nebo malé napájecí napětí a zkrat na výstupu) stavem vysoké impedance, při normálním provozu je přes vnitřní tranzistor uzemněn. Maximální odebíraný proud z pinu je 200  $\mu$ A, je zapotřebí výstup opatřit vhodným pull-up rezistorem. Při zjištění proudového přetížení výstupu, velkého nebo malého napájecího napětí, přepne výstupy do stavu vysoké impedance. K přechodu do normální funkce dojde za časový interval daný vnějšími součástkami. Také aktivací pinu MUTE/STBY/ do logické 0 dojde k přechodu výstupu do stavu vysoké impedance. K tomu dojde vždy, pokud je externím teploměrem naměřena vysoká teplota na chladiči a hrozí poškození zesilovače. Tím je ošetřeno zbytečné přetěžování zesilovače. [18]



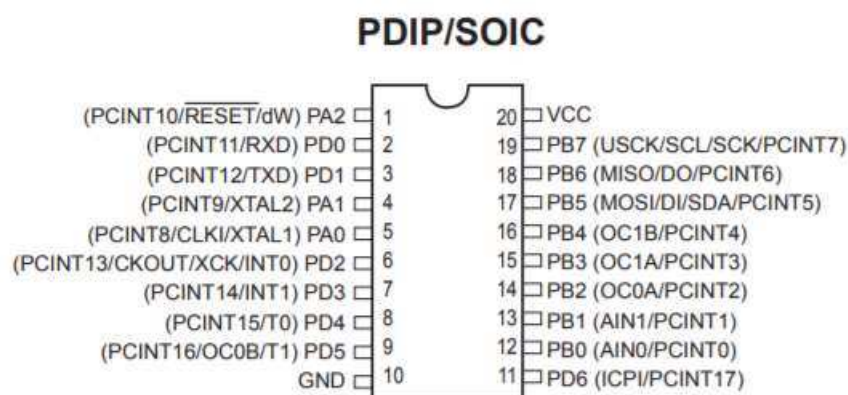
Obr. 36: Zesilovač TDA7498

### 12.3.7 Výstupní filtr

Výstupní nf signál kanálu A a kanálu B (výstupy OUTPA1,2; OUTNA1,2; OUTPB1,2 a OUTNB1,2) je tvořen soustavou ochranných Schottky diod, kondenzátory a cívkami. Zapojení vyplývá z doporučeného zapojení od výrobce.

### 12.3.8 Řídicí mikropočítač

Attiny2313A od firmy ATMEL je nízkonapěťový 8 bitový mikropočítač vyrobený CMOS technologií s architekturou RISC a byl vybrán pro řízení celého systému zesilovače (Obr. 37). Důvod použití je možnost komunikace po I<sup>2</sup>C lince, programování pomocí SPI, je malý, jednoduchý, s dostatečným počtem pinů a je v SMD provedení. V zesilovači bude řízený pomocí vstupních binárních přepínačů a připojené periferie bude řídit pomocí I<sup>2</sup>C linky. [19]



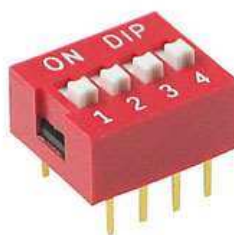
Obr. 37: Řídicí mikropočítač [19]

### 12.3.9 Led indikace

Na předním panelu zesilovače byly umístěny 4 indikační LED – FUNC, LIMIT, DIAG a STBY. Pomocí těchto diod je indikován stav zesilovače, nebo chyby zesilovače. Podrobné vysvětlení funkcí všech diod je uvedeno v kapitole 13, která pojednává a softwarovém vybavení.

### 12.3.10 Ovládání zesilovače

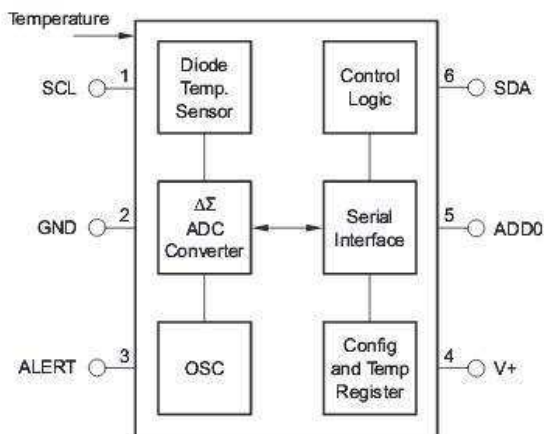
Ovládání zesilovače je prováděno pomocí binárních přepínačů (Obr. 38). Řídit je možno zesílení výšek (5 kHz), středů (1 kHz), basů (100 Hz) a celkovou hlasitost. Každým přepínačem lze nastavit 16 úrovní zesílení signálu. Přepínače budou připojeny přes dva obvody 74HCT244. Jeden takový obvod má dva čtyřbitové paralelní vstupy. Celkem tedy 16 vstupů, kdy vždy čtyři vstupy mají svůj vlastní povolovací signál. Výstupy mohou být připojeny přímo k sobě, protože pokud vypneme pomocí mikropočítače povolovací signál, dané výstupy se přepnou do stavu vysoké impedance a nějak neovlivňují celou linku.



Obr. 38: Binární přepínače[20]

### 12.3.11 Digitální teploměr

Čidlo digitálního teploměru TMP101NA (Obr. 39) je umístěno pod chladičem zesilovače a snímá jeho teplotu. Vlastní zesilovač má sice ochranu před přehřátím, ale tahle ochrana koncový stupeň pouze vypne. Při překročení teploty 90°C dojde k vypnutí zesilovače a po ochlazení na 85 °C se zesilovač opět zapne. Díky tomuto nebude docházet k přehřívání zesilovače a tím se bude šetřit jeho životnost.



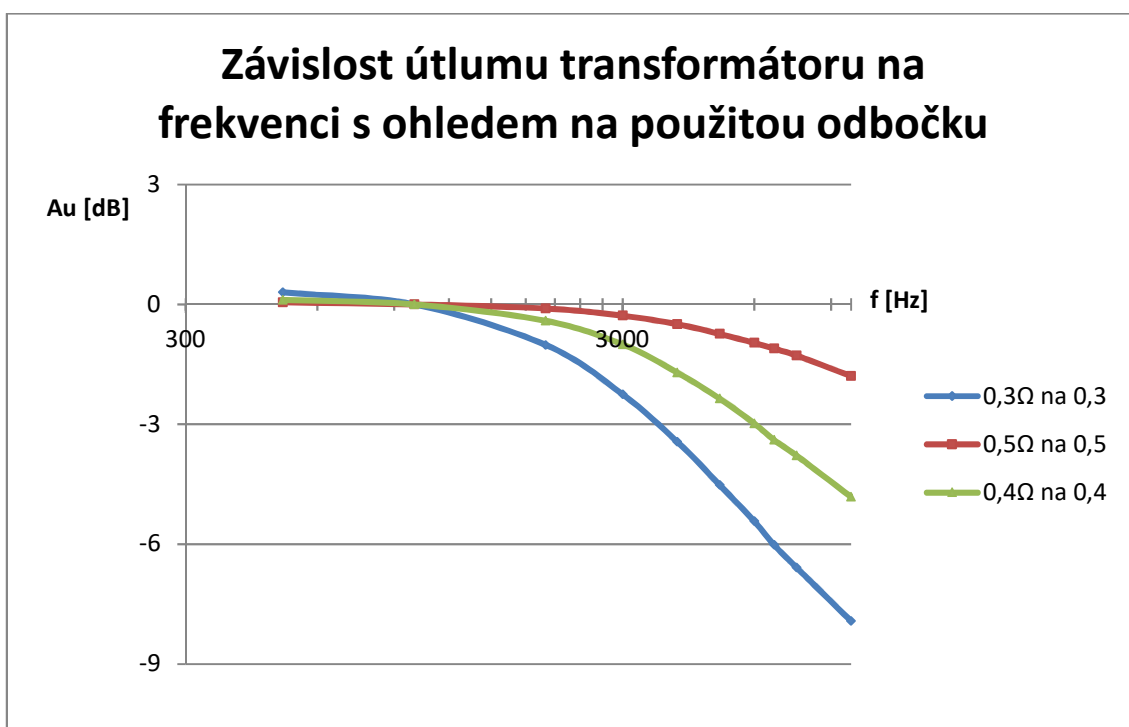
Obr. 39: Digitální teploměr [21]

### 12.3.12 Výstupní transformátor

Pro tak velký proud a nízkou impedanci byl použit toroidní převodní transformátor s výkonem 60 W (Obr. 40). Vstupní impedance byla navržena na 6  $\Omega$ . Dle měření byla vstupní impedance 6,5  $\Omega$ , což ale nemělo významný vliv na funkčnost systému. Výstupní impedance byla 0,5  $\Omega$  s dvěma odbočkami pro 0,4  $\Omega$  a 0,3  $\Omega$  pro smyčky s menší impedancí. Dle měření frekvenčních charakteristik (Obr. 41) vykazuje odbočka 0,5  $\Omega$  nejmenší útlum na vyšších frekvencích. Je tedy nejvýhodnější použít právě tuhle odbočku.



Obr. 40: Výstupní transformátor



Obr. 41: Závislost útlumu transformátoru na frekvenci u odboček 0,5 Ω; 0,4 Ω; 0,3 Ω

### 12.3.13 Napájecí zdroje

Napětové varianty zesilovačů se vždy osadí jedním ze 4 typů stejnosměrných napětových měničů (tabulka 2) od firmy VICOR. Tyto měniče (Obr. 42) mají vždy stejné výstupní napětí  $V_{out} = 24V$ . Primární rozdíl je v rozsahu vstupního napětí. Zákazník musí vždy uvést, na jakém napájecím napětím bude zesilovač provozován a podle toho se osadí jedním z měničů. Tyto měniče dokáží pokrýt požadavky normy ČSN EN 50155, která pojednává o typech a kolísání napájecího napětí. Vstupní napětí je filtrováno pomocí dvou LC filtrů, proti vysokému vstupnímu napětí tvoří ochranu transil a ochranu proti přepólování tvoří čtveřice paralelně zapojených diod. O signalizaci přítomnosti napájecího napětí se stará zelená dioda zapojena na výstupu měniče.



Obr. 42: Měnič VICOR [22]

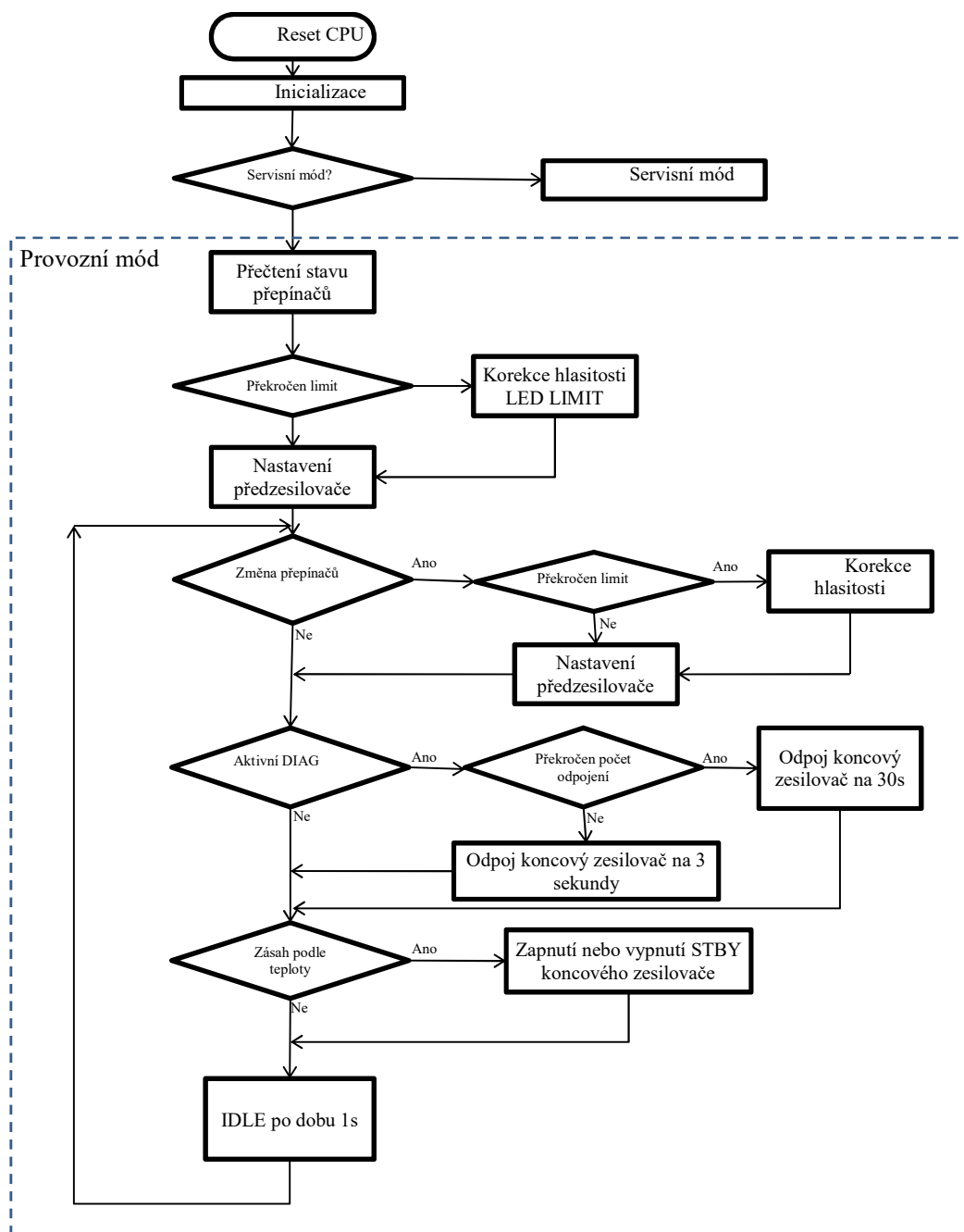
Tabulka 2: Seznam DC/DC měničů

Měnič	$V_{out}$	$V_{cc}$	$U_{min}$	$U_{max}$
VICOR V28C24T100BL3 100W	24 V	24 V	9 V	36 V
VICOR V48C24T100BL3 150W	24 V	48 V	36 V	75 V
VICOR V72C24T100BL3 150W	24 V	72 V	43 V	110 V
VICOR V110C24T100BL3 100W	24 V	110 V	66 V	154 V

Napájecí napětí +9V a +5V pro napájení vnitřních periférií bylo vytvořeno pomocí lineárních stabilizátorů LM217L od firmy STmicroelectronics. Z napětí +9V bylo dále vytvořeno pomocí napětového děliče a tranzistoru další napájecí napětí a to +3,3V.

## 13 SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ ZESILOVAČE

Do zesilovače byly naprogramovány dva režimy – PROVOZNÍ a SERVISNÍ. Pokud po zapnutí zařízení mikropočítač detekuje chybu na I<sup>2</sup>C lince, rozsvítí se červená LED D5, STBY LED, DIAG LED a mikropočítač se nebude nacházet ani v jednom režimu. V tomhle případě nedojde k inicializaci korekčního předzesilovače a zesilovač nelze provozovat. Blokové schéma programu je na obrázku 43.



Obr. 43 Vývojový diagram programu

## 13.1 Provozní režim

V provozním režimu se mikropočítač nachází automaticky po připojení napájení. Tento režim indikuje LED D2 FUNKCE, která pomalu bliká (interval asi 1,5 s). Blikáním pouze LED D2 FUNKCE je indikovaná správná funkce zesilovače.

Mikropočítač opakovaně detekuje hodnoty přepínačů S1 až S4 přes budiče IO7 a IO8. Podle nastavené hodnoty přepínačů pak po I<sup>2</sup>C lince řídí korekční předzesilovač TDA7418 (IO3).

Dalším úkolem mikropočítače je čtení teploty z teploměru umístěným pod chladičem výkonového stupně. Při zvýšené teplotě (90 °C) dojde automaticky k vypnutí zesilovače, aby nedošlo k jeho tepelnému namáhání. Po ochlazení chladiče (85 °C) je uveden zesilovač zpět do běžného provozu.

Řízením MUTE/STBY/ je koncový zesilovač přiváděn do stavu MUTE a STBY nebo do provozního režimu. Stav MUTE/STBY je indikován LED D4 MUTE. Do tohoto stavu je koncový zesilovač přiveden, pokud nastane jedna z těchto událostí:

- mikropočítač zaznamená chybu na I<sup>2</sup>C lince,
- mikropočítač zaznamená chybu komunikace s korekčním předzesilovačem,
- nastane 5x chybová hláška (signál) z pinu DIAG, přičemž jednotlivé signály nesmí mít mezi sebou rozestup delší než 30 s,
- dojde k nadměrnému přehřátí chladiče (95°C).

Pokud mikropočítač přivede koncový zesilovač do stavu MUTE/STBY z důvodu chybové hlášky, dojde každých 30 s k ověření chybové hlášky a pokud by se chybová hláška znovu nevyskytla, zesilovač se vrátí do normálního provozu. Jestli se chybová hláška bude opakovat, koncový stupeň bude v režimu MUTE/STBY. V tomhle případě bude mikropočítač vždy indikovat příslušnou poruchu.

### 13.1.1 Limitace výkonu

LED LIMIT indikuje softwarové přetížení výkonu. Maximální výkon zesilovače je při:

SETUP VOLUME	=	0dB
SETUP 100 Hz (BASS)	=	0dB
SETUP 1 kHz (MIDDLE)	=	0dB
SETUP 5 kHz (TREBLE)	=	0dB,



LED LIMIT začne indikovat v okamžiku, kdy je překročena hodnota 0dB. Z naměřených hodnot vyplývá, že u frekvence 5 kHz nedochází k zesílení o +1 dB, ale pouze o +2/3 dB.

K překročení výkonu dojde v případě, když je součet VOLUME + (100 Hz nebo 5 kHz) větší než 0 dB.

Příklad: VOLUME = -2 dB, 100 Hz = +2 dB, 5 kHz = +4 dB.

V tomto případě je nastavení 100 Hz v pořádku ( $-2 \text{ dB} + 2 \text{ dB} = 0 \text{ dB}$ ), ale hodnota 5 kHz ( $-2 \text{ dB} + 4 \cdot (2/3) \text{ dB} = +0,66 \text{ dB}$ ) překračuje dovolené zesílení (0 dB). U obvodu TDA7418 mikropočítač softwarově nastaví 5 kHz na možnou maximální hodnotu (0 dB), tedy méně, než je na přepínači S4. Protože fyzické nastavení přepínačů (5 kHz +4 dB), neodpovídá softwarovému nastavení obvodu TDA7418 (korekční předzesilovač), je tento stav indikován LED LIMIT (D5).

Pokud je zesílení 100 Hz a 5 kHz o +15 dB, musí být VOLUME = -15 dB. V případě, že dojde u korekce frekvence 1 kHz ke ztlumení pod -6 dB (včetně) je možné ještě zvýšit hlasitost na -10 dB. Zvýšení hlasitosti je dovolené z důvodu, že při útlumu na 1 kHz dochází i k mírnému nechtěnému útlumu na 100 Hz a 5 kHz.

## 13.2 Servisní režim

Do tohoto režimu je možno přejít současným držením tlačítka S6 a resetováním procesoru (stiskem tlačítka S5). LED D2 FUNC dvakrát krátce poblikává. Koncový zesilovač IO2 je ve stavu MUTE/STBY - svítí LED D4 STBY a LED D3 DIAG.

Korekční předzesilovač TDA7418 (IO3) je nastavený na maximální výkon:

SETUP VOLUME	=	0dB
SETUP 100 Hz (BASS)	=	0dB
SETUP 1 kHz (MIDDLE)	=	0dB
SETUP 5 kHz (TREBLE)	=	0dB.

Pokud mikropočítač zaznamená nějakou chybu, nelze provádět běžné oživení. Nejdříve je potřeba vyřešit danou chybu a až po odstranění této chyby je možno pokračovat v běžném oživení. V tomto režimu se provádí kontrola binárních přepínačů a oživení analogových částí zesilovače.

## 13.3 Chyby zesilovače indikované LED

Jak bylo výše uvedeno, pokud mikropočítač zaznamená během provozu chybu u

některé ze svých periférií, nebo přehřátí chladiče, provádí indikaci pomocí LED na čelním panelu. Pomocí sekvence blikání LED je možno snadno identifikovat chybu.

### **13.3.1 V servisním režimu:**

V tomhle režimu umí mikropočítač detekovat dvě chyby. Chyba při komunikaci s korekčním předzesilovačem je indikována tím, že červená LED a zelená LED blikají současně. Druhá chyba je při komunikaci s teploměrem. Tato chyba je indikována když červená LED a zelená LED blikají s opačnou fází (zelená blikne dvakrát v krátkém časovém intervalu, červená zhasne dvakrát v krátkém časovém intervalu). LED STBY a DIAG vždy svítí

### **13.3.2 Během provozu**

Během běžného provozu umí rozeznat mikropočítač tři chyby. Pokud na panelu střídavě bliká červená LED a zelená LED se střídou blikání 1:1, byl vyslán signál z pinu DIAG, který značí jednu z následujících chyb:

- přehřátí koncového zesilovače,
- zkrat na výstupu koncového zesilovače,
- vysoké napájecí napětí,
- nízké napájecí napětí.

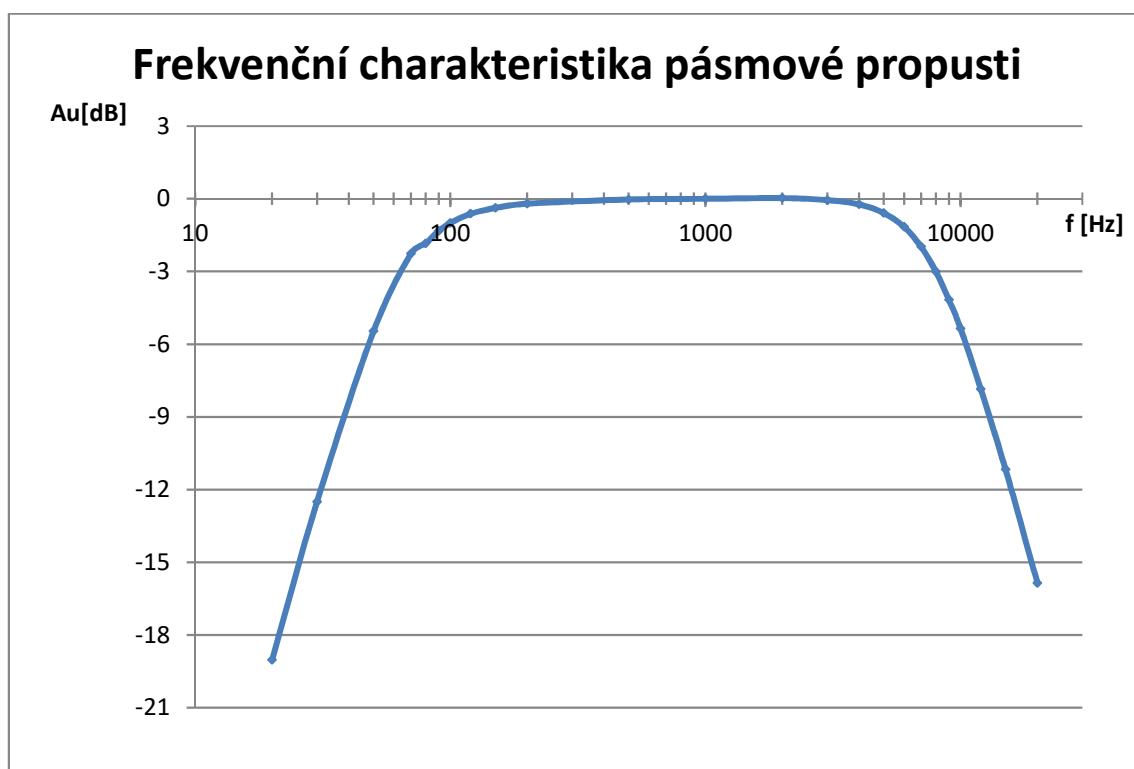
Chyba korekčního zesilovače je indikovaná blikáním pouze červené LED, a pokud při bliknutí zelené LED krátce problikne červená LED, znamená to přehřátí zesilovače indikované digitálním teploměrem. Při jakékoliv chybě LED STBY a DIAG vždy svítí a znamená to, že je vypnuta činnost koncového stupně.

## 14 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Naměřené výsledky se téměř shodovaly s teoretickým předpokladem. Výsledný proud  $8 A_{ef}$  je na hranici výkonu koncového stupně při napájecím napětí 24 V. V níže popsaných kapitolách je z měřených charakteristik vidět, jak se mění útlum a zesílení frekvenčních pásem v korekčním předzesilovači a jak bylo zapotřebí nastavit programově maximální výkon, aby koncový stupeň nebyl za žádných okolností přetěžován nebo nedocházelo ke zbytečným ztrátám na výkonu.

### 14.1 Pásmová propust

Dle teoretických předpokladů navržení pásmové propusti dochází na frekvenci 100 Hz a 5 kHz k útlumu 1 dB (Obr. 44). Ostatní frekvence jsou díky koncepci pásmové propusti silně potlačeny, aby docházelo jen k přenosu chtěného pásma.



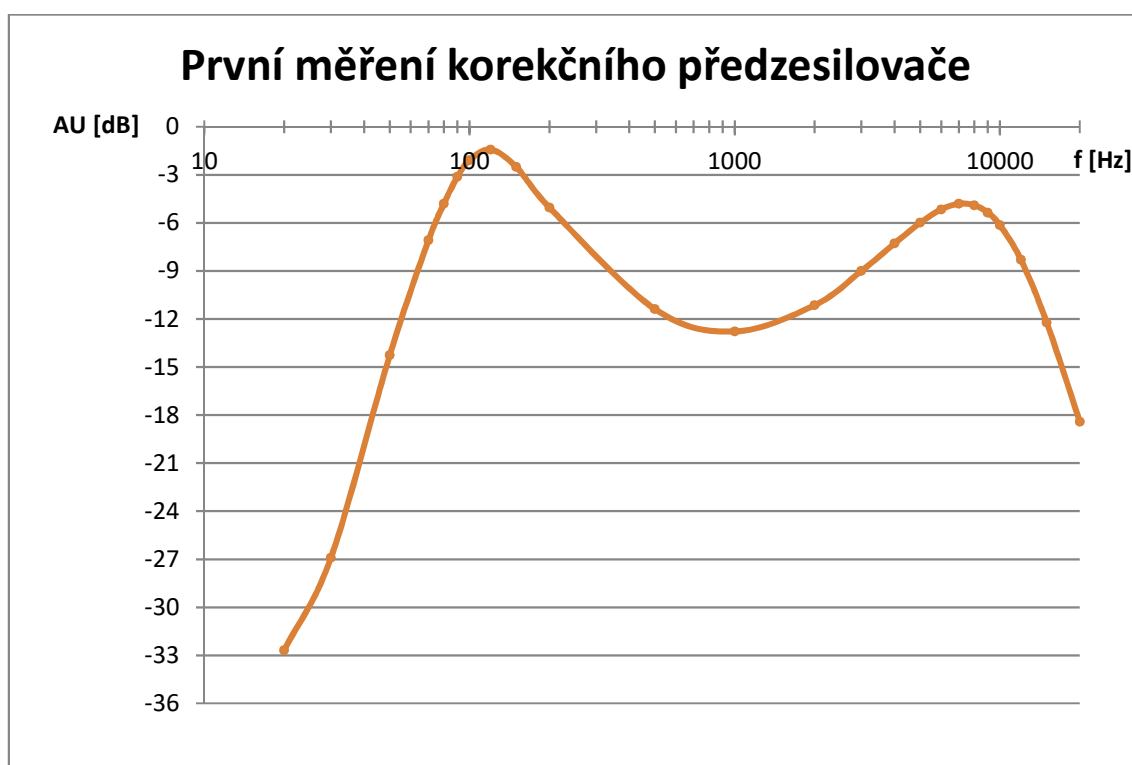
Obr. 44: Měřená charakteristika pásmové propusti

### 14.2 Korekční předzesilovač

Z prvního měření korekčního předzesilovače bylo vidět (Obr. 45), že maximální zesílení 5 kHz bylo menší, než zesílení 100 Hz, ale celková hlasitost byla na nejmenší úrovni (-15 dB). Proto byl program upraven tak, aby při maximálním zesílení 5 kHz mohlo ještě dojít k celkovému zesílení hlasitosti, přičemž zesílení na 100 Hz nesmělo být větší než +10 dB. Útlum 1 kHz byl u tohoto měření nastaven na 0 dB. Výsledek druhého měření je na obrázku 46.

Tabulka 3: Softwarové nastavení korekcí pomocí přepínačů S2 – S4

S2 - SETUP 1 kHz				Au	S3 - SETUP 100 Hz				Au	S4 - SETUP 5 kHz				Au
1	2	3	4	dB	1	2	3	4	dB	1	2	3	4	dB
ON	ON	ON	ON	-15	ON	ON	ON	ON	0	ON	ON	ON	ON	0
ON	ON	ON	OFF	-14	ON	ON	ON	OFF	1	ON	ON	ON	OFF	1
ON	ON	OFF	ON	-13	ON	ON	OFF	ON	2	ON	ON	ON	OFF	2
ON	ON	OFF	OFF	-12	ON	ON	OFF	OFF	3	ON	ON	OFF	OFF	3
ON	OFF	ON	ON	-11	ON	OFF	ON	ON	4	ON	OFF	ON	ON	4
ON	OFF	ON	OFF	-10	ON	OFF	ON	OFF	5	ON	OFF	ON	OFF	5
ON	OFF	OFF	ON	-9	ON	OFF	OFF	ON	6	ON	OFF	OFF	ON	6
ON	OFF	OFF	OFF	-8	ON	OFF	OFF	OFF	7	ON	OFF	OFF	OFF	7
OFF	ON	ON	ON	-7	OFF	ON	ON	ON	8	OFF	ON	ON	ON	8
OFF	ON	ON	OFF	-6	OFF	ON	ON	OFF	9	OFF	ON	ON	OFF	9
OFF	ON	OFF	ON	-5	OFF	ON	OFF	ON	10	OFF	ON	OFF	ON	10
OFF	ON	OFF	OFF	-4	OFF	ON	OFF	OFF	11	OFF	ON	OFF	OFF	11
OFF	OFF	ON	ON	-3	OFF	OFF	ON	ON	12	OFF	OFF	ON	ON	12
OFF	OFF	ON	OFF	-2	OFF	OFF	ON	OFF	13	OFF	OFF	ON	OFF	13
OFF	OFF	OFF	ON	-1	OFF	OFF	OFF	ON	14	OFF	OFF	OFF	ON	14
OFF	OFF	OFF	OFF	0	OFF	OFF	OFF	OFF	15	OFF	OFF	OFF	OFF	15



Obr. 45: Základní měření korekčního zesilovače

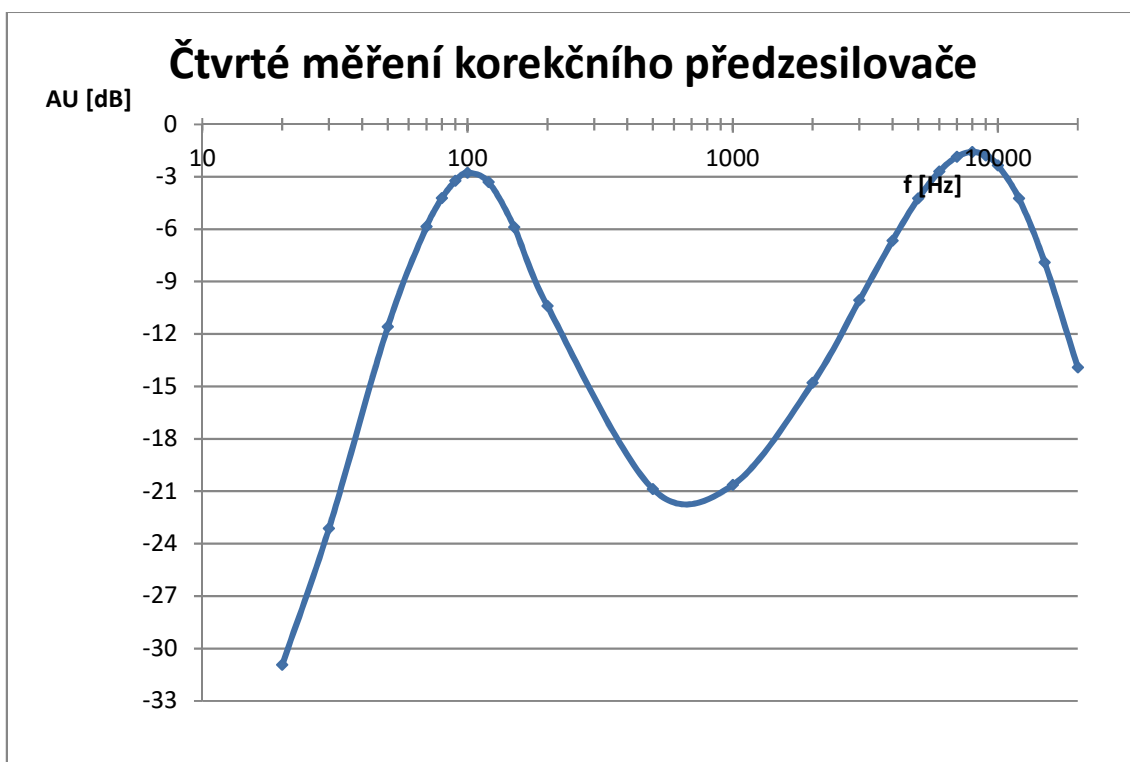


Obr. 46: Softwarově upravený maximální výkon bez útlumu na 1 kHz

Při dalším měření byl nastaven útlum frekvence 1 kHz na -15 dB. Tímto lze dosáhnout většího absolutního rozdílu mezi frekvencí 1 kHz a frekvencemi 100 Hz a 5 kHz. Potlačení 1 kHz se bude využívat pouze v případě, kdy bude vznikat nadměrný útlum na frekvenci 5 kHz vlivem ztrát v železe. Na obrázku 47 je vidět, že absolutní rozdíl mezi frekvencemi 1 kHz a 5 kHz je 20 dB. Celkový výkon zesilovače byl ale touhle korekcí snížen (Obr. 47), proto bylo zapotřebí program ještě upravit tak, aby dovolil zvýšit celkovou hlasitost. Výsledky posledního měření byly zaznamenány na obrázku 48. Jedná se o největší výkon, který zesilovač zvládne s největším rozdílem na frekvenci 1 kHz a frekvencích 100 Hz a 5 kHz.



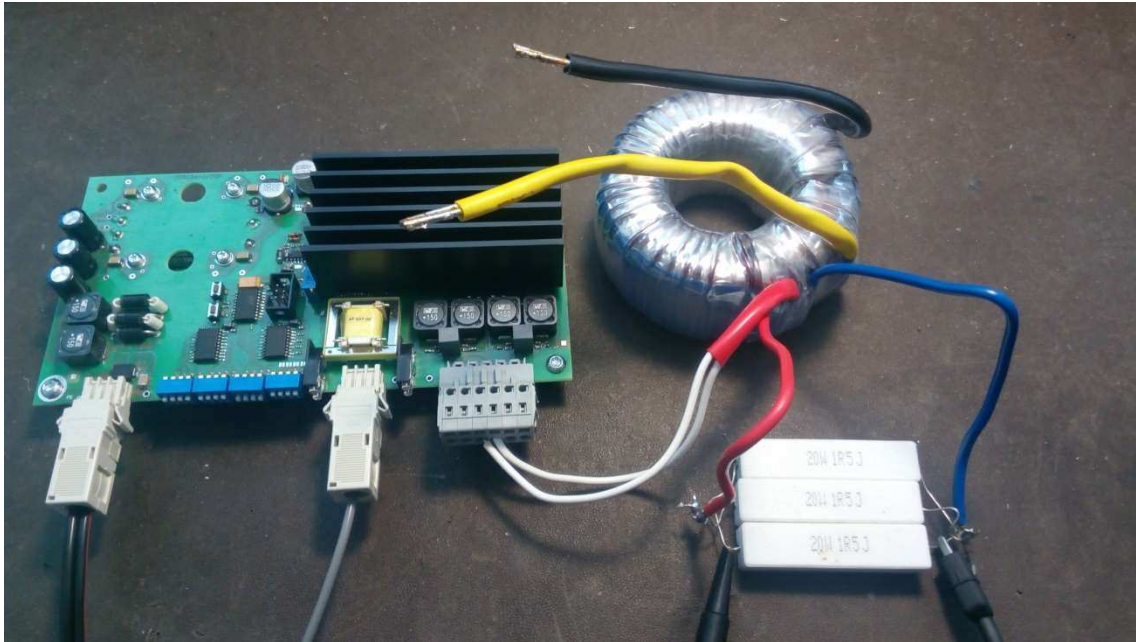
Obr. 47: Měření s útlumem na frekvenci 1 kHz



Obr. 48: Výsledné měření korekčního předzesilovače

### 14.3 Celkový výkon

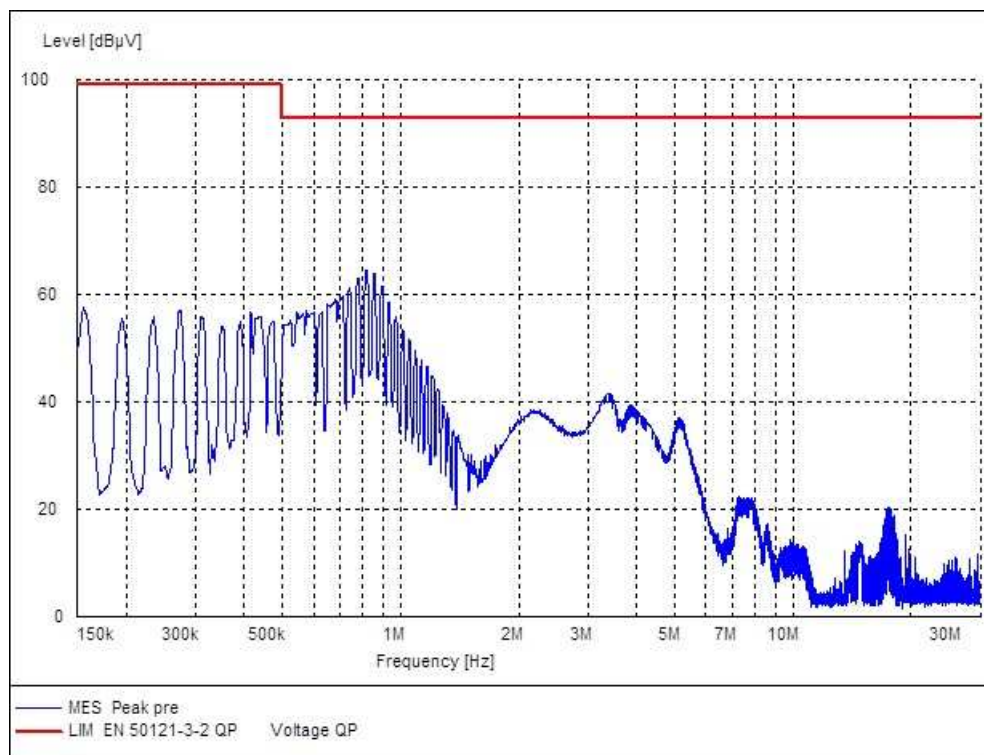
Měření celkového výkonu (Obr. 49) bylo prováděno do rezistorové zátěže  $0,5\ \Omega$  ( $3 \times$  paralelně  $1,5\ \Omega$ ). Na téhle zátěži byla naměřena amplituda  $U = 4\ V_{ef}$ . Frekvence signálu byla  $1\ kHz$  a vstupní napětí celého zařízení bylo  $0,775\ V_{ef}$ . Napětí  $4\ V_{ef}$  na rezistorové zátěži  $0,5\ \Omega$  vyvolá proud  $8\ A_{ef}$ .



Obr. 49: Elektronika zesilovače s převodním transformátorem

## 15 VÝSLEDKY EMC MĚŘENÍ

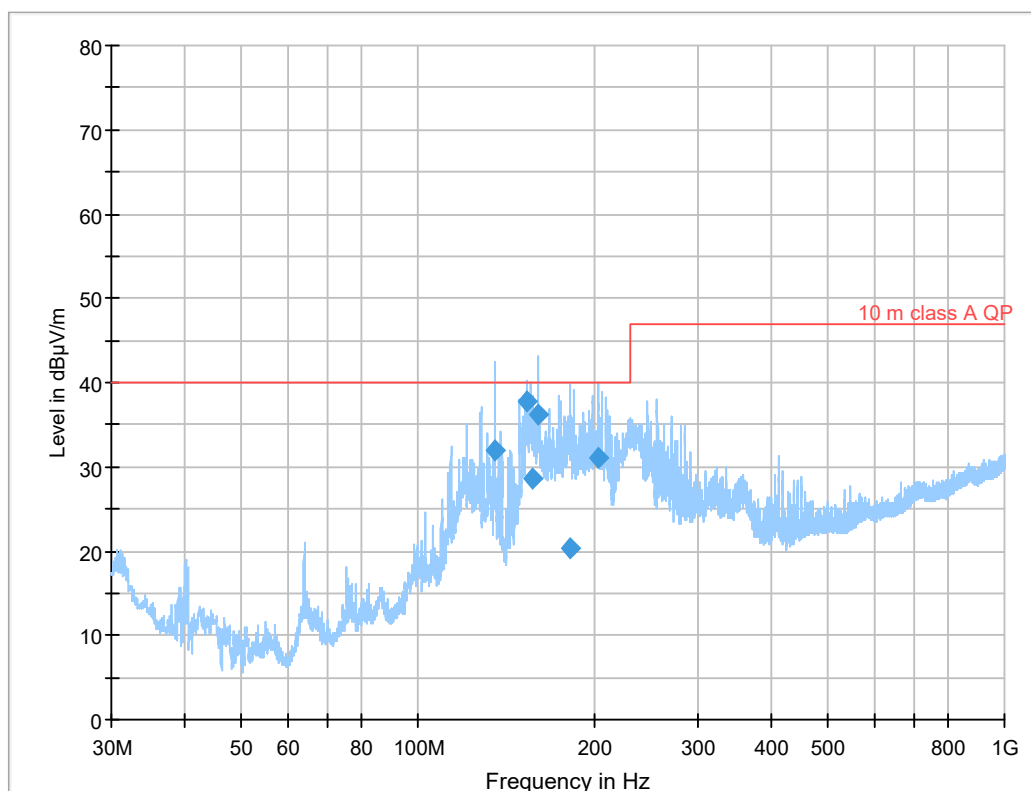
První měření EMC bylo měření vyzařování z kabelu. U zařízení bylo provedeno měření vyzařování z kabelu pro napájecí napětí, pro nízkofrekvenční vstup a pro nízkofrekvenční výstup. Výsledky jsou zaznamenány na obrázku 50 a je vidět, že na žádné frekvenci není přesáhnuta maximální hranice, která je vyznačena červenou linkou. Měření bylo prováděno na frekvencích od 150 kHz do 30 MHz.



Obr. 50: Výsledky EMC vyzařování z kabelu

Druhé měření EMC bylo celkové vyzařování přístroje do prostoru. Měření bylo prováděno na frekvencích od 30 MHz do 1 GHz. Zařízení bylo měřeno ze vzdálenosti 10 metrů vždy z různých stran zařízení a v různé výšce nad zařízením. Byla měřena horizontální a vertikální polarizace rušení. Měření bylo zaznamenáno do jednoho grafu, kde se vždy přičetl jen nejhorší případ. Výsledná křivka je tedy složena z několika grafů a je zobrazena na obrázku 51. Červená křivka značí hranici normy, pod kterou se rušení musí nacházet.





Obr. 51: Výsledek měření rušení zařízení

Z obrázku je vidět, že rušení na frekvencích v rozmezí 100 MHz a 200 MHz přesáhlo přípustnou hranici (Obr. 51). V tomhle případě došlo k doměření těchto frekvencí QuasiPeakem (vyznačeno modrými body na obrázku 51), což znamená, že měření na dané frekvenci probíhalo 2 minuty a z průběžných výsledků byl konečný výsledek spočítán pomocí aritmetického průměru. Tím lze zjistit, jestli zařízení ruší trvale, nebo se jednalo pouze o krátký rušivý pulz. Výsledky doměření jsou zaznamenány v tabulce 4 a je vidět, že nedochází k překročení přípustné hranici rušení 40 dBµV/m.

Tabulka 4: Výsledky doměření EMC

Frequency (MHz)	QuasiPeak (dBµV/m)	Limit (dBµV/m)	Height (cm)	Pol	Azimuth (deg)
135.134500	32.01	40.00	122.0	V	232.0
152.866000	37.66	40.00	400.0	H	101.0
156.358000	28.52	40.00	345.0	V	129.0
160.000000	36.17	40.00	388.0	V	11.0
182.089500	20.38	40.00	257.0	V	184.0
202.687000	31.00	40.00	300.0	H	101.0

## 16 PŘÍPRAVEK PRO OŽIVENÍ ZESILOVAČE

Pro oživení a testování zesilovače byl vyroben i testovací přípravek (Obr. P. 4). Přípravek slouží pro testování obou výstupních kanálů nezávisle na sobě. Schéma zapojení je uvedeno na obrázku 53. Vstup přípravku je pro každý kanál rezistorová zátěž  $6,5 \Omega$ , což odpovídá reálné impedanci převodního transformátoru pro indukční smyčku. Každá zátěž se dá přepínačem „ZÁTĚŽ“ připojit, nebo odpojit. Tlačítkem „ZKRAT“ je možnost zkratovat vstupní svorky a tím otestovat ochranu proti zkratu na výstupu u koncového zesilovače TDA7498. Přepínačem „REPRO“ je možnost přepnout na zátěž s reproduktorem, nebo na rezistorovou zátěž – tím se impedance změní, ale pouze minimálně a nemá vliv na celkové testování. Výstupní konektor BNC slouží k připojení osciloskopu. Rezistory  $10 \Omega$  a  $1,8 \Omega$  jsou s výkonem 20 W. Rezistory  $180 \Omega$  a  $120 \Omega$  jsou s výkonem 2 W. Reprodukter má výkon 0,5 W a impedanci  $45 \Omega$ .

### 16.1 Výpočty pro přípravek

Vstupní napětí ze zesilovače je  $U_{in}=15 V_{ef}$ .

Výpočet celkové impedance (s rezistorem  $180 \Omega$  na přepínači „REPRO“):

$$Z = \frac{\left(\frac{10 \Omega * 10 \Omega}{10 \Omega + 10 \Omega} + 1,8 \Omega\right) * 180 \Omega}{\left(\frac{10 \Omega * 10 \Omega}{10 \Omega + 10 \Omega} + 1,8 \Omega\right) + 180 \Omega} = 6,55 \Omega \quad (17)$$

Výpočet výkonu na rezistorech a reproduktoru:

Výpočet výkonu na rezistoru  $10 \Omega$ :

$$P_{10 \Omega} = \left(\frac{\frac{15 V_{ef}}{6,8 \Omega}}{2}\right)^2 * 10 \Omega = 12,16 W . \quad (18)$$

Výpočet výkonu na rezistoru  $1,8 \Omega$ :

$$P_{1,8 \Omega} = \left(\frac{15,3 V_{ef}}{6,8 \Omega}\right)^2 * 1,8 \Omega = 8,76 W . \quad (19)$$

Výpočet výkonu na rezistoru  $180 \Omega$ :

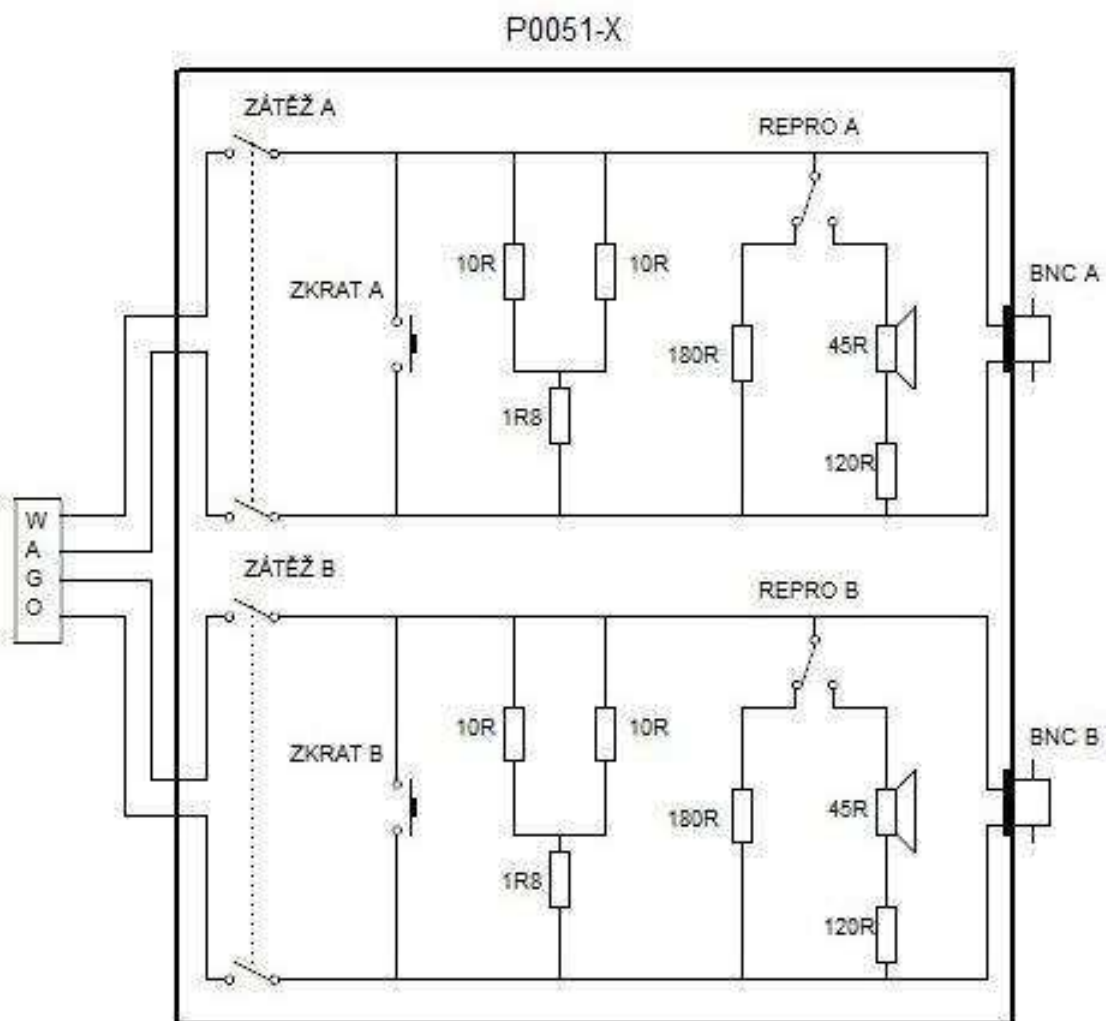
$$P_{180 \Omega} = \frac{15,3 V_{ef}^2}{180 \Omega} = 1,25 W . \quad (20)$$

Výpočet výkonu na rezistoru  $120 \Omega$ :

$$P_{120 \Omega} = \left(\frac{15,3 V_{ef}}{165 \Omega}\right)^2 * 120 \Omega = 1 W . \quad (21)$$

Výpočet výkonu na reproduktoru 45  $\Omega$ :

$$P_{REPRO} = \left( \frac{15,3 V_{ef}}{165 \Omega} \right)^2 * 45 \Omega = 0,37 W. \quad (22)$$



Obr. 52: Schéma zapojení přípravku pro oživení zesilovače

# ZÁVĚR

První částí diplomové práce bylo zaměřit se na problematiku a realizaci indukční smyčky zejména pro vozidla drážní dopravy. Druhou částí práce bylo navrhnout obvodové zapojení nf zesilovače s dostatečným výkonem pro vybuzení indukční smyčky v běžném osobním vagónu a realizovat funkční vzorek elektroniky.

Indukční smyčka pomáhá všem sluchově postiženým lidem, kteří používají naslouchátka s možností přijímání signálu z magnetického pole. Okolo plochy, která má být signálem pokryta, je veden vodič, který je buzený zesilovačem pro indukční smyčku. Umístění smyčky bylo určeno z výpočtů a z konstrukčních možností osobního vagónu.

Intenzita magnetického pole nesmí překročit hodnotu  $H = 400 \text{ mA/m}$  v místech, ve kterých je možnost výskytu lidí. Nominální hodnota pro sílu signálu normálního poslechu je  $H = 100 \text{ mA/m}$ , což odpovídá asi 70 dB akustického tlaku.

Protože intenzita magnetického pole okolo vodiče vzrůstá s proudem, nezáleží tolik na výkonu dodaného do smyčky, ale jen na velikosti protékajícího proudu. Logicky lze odvodit, že čím menší je impedance smyčky, tím je zapotřebí menšího výkonu zesilovače při stejné intenzitě magnetického pole. Běžné zesilovače však nedokáží pokrýt impedanci v řádech stovek  $\text{m}\Omega$ , ale pohybují se okolo  $2 \Omega$ ,  $4 \Omega$ ,  $6 \Omega$  a  $8 \Omega$ . Kovové konstrukce mají významný vliv na útlum magnetického pole, proto byl výstupní proud dimenzován na  $8 A_{\text{ef}}$ , přičemž impedance smyčky byla stanovena na  $0,5 \Omega$  s odchylkou  $\pm 0,1 \Omega$ .

Díky velké účinnosti byl výkonový stupeň zesilovače zvolen ve třídě D, konkrétně model TDA7498. Ze zesilovače je v běžném provedení použit pouze jeden výstupní kanál, pro jednu indukční smyčku. Ve zvláštních případech lze jednoduše využít oba výstupní kanály a budit dvě indukční smyčky, které se svým magnetickým polem nebudou navzájem ovlivňovat. Výkon zesilovače je do velkého proudu a nízké impedance převáděn pomocí toroidního transformátoru. Pro splnění požadavku normy ČSN EN 60118-4, která říká, že magnetické pole se v rozsahu 100 Hz až 5 kHz nesmí lišit od hodnoty při 1 kHz o  $\pm 3 \text{ dB}$ , byl použit korekční předzesilovač TDA7418, kterým lze magnetické pole linearizovat. Pro řízení a monitorování zařízení byl použit jednoduchý mikropočítač ATtiny2313. O napájení celého zařízení se stará DC/DC měnič VICOR, jehož typ se mění s požadavkem na napájecí napětí od zákazníka.

Měřené výsledky odpovídaly teoretickým předpokladům. Pouze u korekčního zesilovače docházelo k nechtěným útlumům některých frekvencí, což bylo vyřešeno pomocí softwaru. Výstupní výkon  $8 A_{\text{ef}}$  byl testován do rezistorové zátěže  $0,5 \Omega$ . Také výsledky z EMC rušení ukazují, že zařízení nepřesahuje přípustné hodnoty vyzařování.

Výsledkem práce bylo seznámení se s problematikou týkající se indukční smyčky pro nedoslýchavé a na tomto základě byl navrhnout a realizován funkční vzorek elektroniky zesilovače pro indukční smyčku.

# LITERATURA

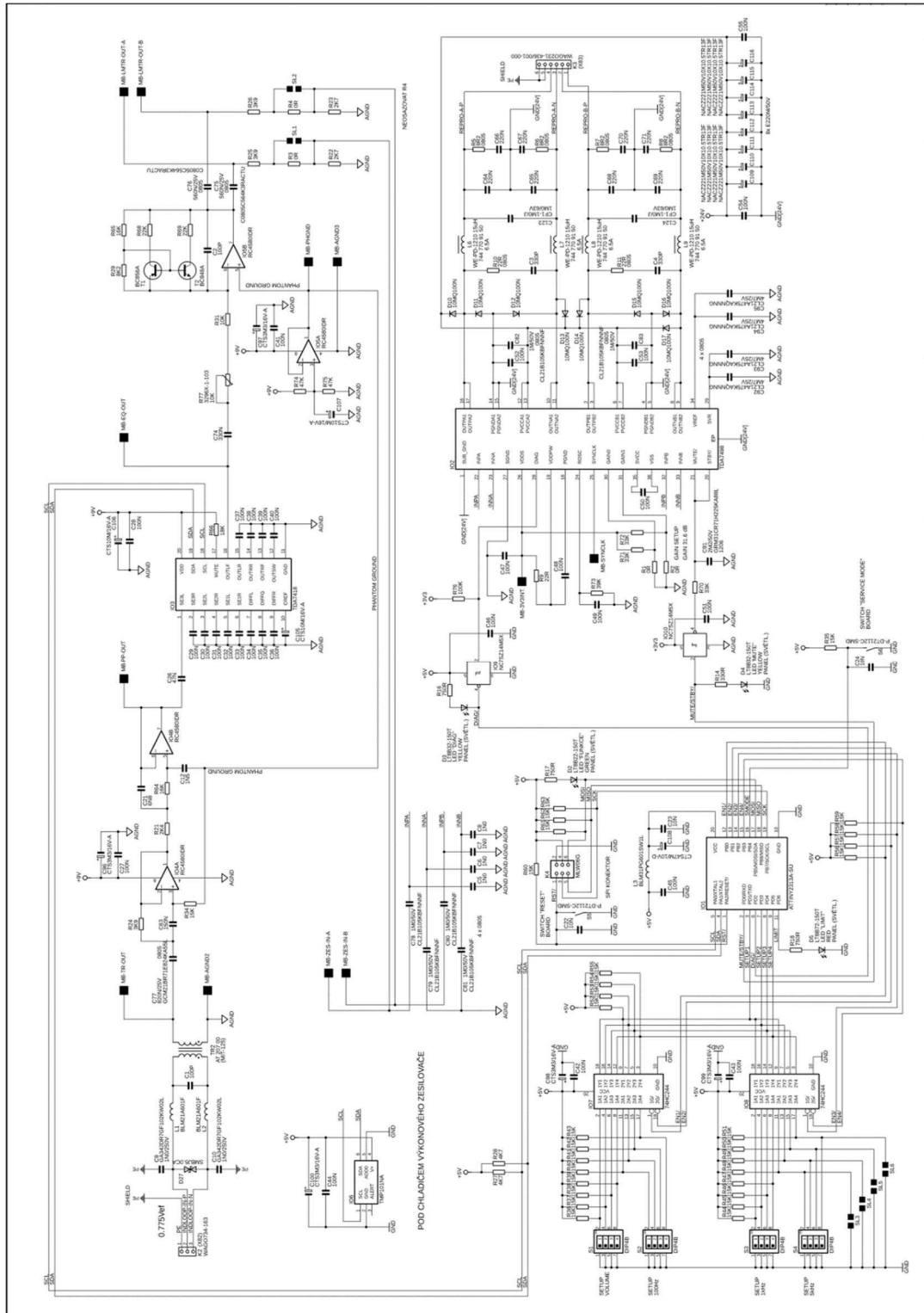
- [1] *Co je indukční smyčka?* [online] 11. 7. 2016 [cit. 5. 10. 2017]. Dostupné z: <http://cz.general-seven.com/>
- [2] *A Guide to Audio-Frequency Induction Loop System* [online] 7. 12. 2015 [cit. 5. 10. 2017] Dostupné z WWW: [http://www.aesireland.ie/sites/default/files/ctec\\_afils\\_guide\\_rev3.pdf](http://www.aesireland.ie/sites/default/files/ctec_afils_guide_rev3.pdf)
- [3] DUDÍK, Jan. *Naslouchadlo* [online] 5. 10. 2017 [cit. 6. 10. 2017] Dostupné z www: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Naslouchadlo>
- [4] *DESIGN GUIDE Induction loop system* [online] 4. 7. 2017 [cit. 6. 10. 2017] Dostupné z www: [https://www.williamssound.com/resources/products/web/design\\_guides/design\\_guide\\_induction\\_loop\\_systems.pdf](https://www.williamssound.com/resources/products/web/design_guides/design_guide_induction_loop_systems.pdf)
- [5] *Zesilovač pro indukční smyčku Plena* [online] 10. 1. 2014 [cit. 6. 10. 2017] Dostupné z www: [http://s3.abbas.cz/PRODUKT/Manual/Bosch\\_audio/PLN\\_1LA10\\_OIG\\_CZ.pdf](http://s3.abbas.cz/PRODUKT/Manual/Bosch_audio/PLN_1LA10_OIG_CZ.pdf)
- [6] VESELÝ, Vojtěch. *Magnetické pole* [online] 2. 1. 2017 [cit. 18. 10. 2017] Dostupné z www: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A9\\_pole](https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A9_pole)
- [7] VIDLIČKA, Marian. *Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole* [online] 14. 5. 2017 [cit. 18. 10. 2017] Dostupné z www: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/teoreticky-uvod/fyzikalni-veliciny-popisujici-magneticke-pole/>
- [8] *Magnetické pole kolem přímého dlouhého tenkého vodiče* [online] 30. 12. 2015 [cit. 18. 10. 2017] Dostupné z www: [http://old.elmag.org/sites/default/files/users/pankrac/files/46\\_67\\_magnetick%C3%A9\\_pole\\_induk%C4%8Dnosti.pdf](http://old.elmag.org/sites/default/files/users/pankrac/files/46_67_magnetick%C3%A9_pole_induk%C4%8Dnosti.pdf)
- [9] [B] L. K Satapathy. *vDo QA Magnetism 2/ Magnetic Field of Rectangular Loop / IIT JEE Physics / L.K Satapathy* [online] 27. 6. 2015 [cit. 17. 1. 2018] Dostupné z www: <https://www.youtube.com/watch?v=wSJPOEqMLrw>
- [10] ČSN EN 60118-4. *Sluchadla - Část 4: Intenzita magnetického pole magnetických smyček používaných pro účely sluchadel*, 2015
- [11] OLEJÁR, Martin. *Audio zesilovače pracující ve třídě D* [online] 30. 6. 2017 [cit. 20. 10. 2017] Dostupné z www: <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109>
- [12] ŠTÁL, Petr. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D: [základní principy a konstrukce zesilovače]*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-230-5.
- [13] MAJLING, Eduard. *Transformátor – základní vlastnosti a dělení* [online] 5. 4. 2015 [cit. 20. 10. 2017] Dostupné z www: <http://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>
- [14] *Sennheiser Infrared Systems* [online] 2. 12. 2016 [cit. 17. 11. 2017] Dostupné z www: <https://soundinduction.co.uk/pages/infrared-hearing-systems/>
- [15] ČSN EN 50155 ed.4. *Drážní zařízení – Elektronická zařízení drážních vozidel*, 2018
- [16] BENJAMIN, Stephens. *Second Order Active Filters* [online] 14. 12. 2008 [cit. 17. 1. 2018] Dostupné z www: [http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Second\\_Order\\_Active\\_Filters](http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Second_Order_Active_Filters)

- [17] STMicroelectronics. Tda7418 [online] 2013 [cit. 29. 11. 2017] Dostupné z www: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/9a/69/6b/e6/03/e0/43/86/CD00152242.pdf/files/CD00152242.pdf/jcr:content/translations/en.CD00152242.pdf>
- [18] STMicroelectronics. Tda7498 [online] 2015 [cit. 29. 11. 2017] Dostupné z www: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/db/c5/04/74/fd/08/43/de/CD00244535.pdf/files/CD00244535.pdf/jcr:content/translations/en.CD00244535.pdf>
- [19] Atmel. Attiny2313A [online] 2011 [cit. 29. 11. 2017] Dostupné z www: <http://www.atmel.com/images/doc8246.pdf>
- [20] ODAY, Saeed. *DIP Switch (4-Pin)* [online] 21. 12. 2017 [cit. 20. 1. 2018] Dostupné z www: <https://potentiallabs.com/cart/dip-switch-4-pin>
- [21] Texas Instruments. TMP101 [online] 2015 [cit. 29. 11. 2017] Dostupné z www: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos231i/sbos231i.pdf>
- [22] VICOR. Micro Family 24 V Input [online] 2017 [cit. 20. 1. 2018] Dostupné z www: [http://cdn.vicorpower.com/documents/datasheets/ds\\_24vin-micro-family.pdf](http://cdn.vicorpower.com/documents/datasheets/ds_24vin-micro-family.pdf)

# SEZNAM PŘÍLOH

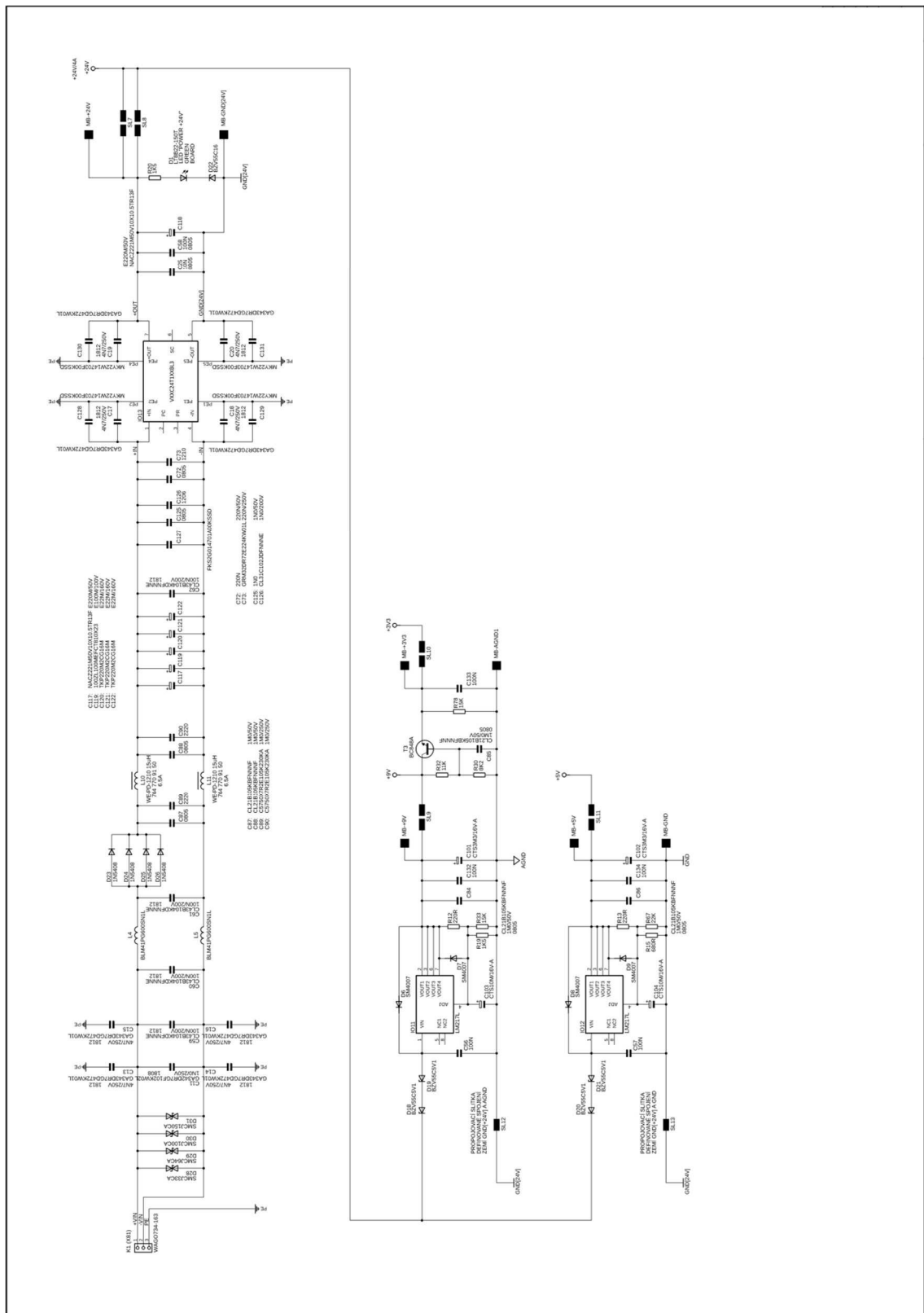
<b>Příloha 1: Schéma zapojení elektroniky zesilovače .....</b>	<b>64</b>
<b>Příloha 2: Hotový zesilovač pro indukční smyčku.....</b>	<b>66</b>
<b>Příloha 3: Přípravek pro zesilovač .....</b>	<b>67</b>

# Příloha 1: Schéma zapojení elektroniky zesilovače



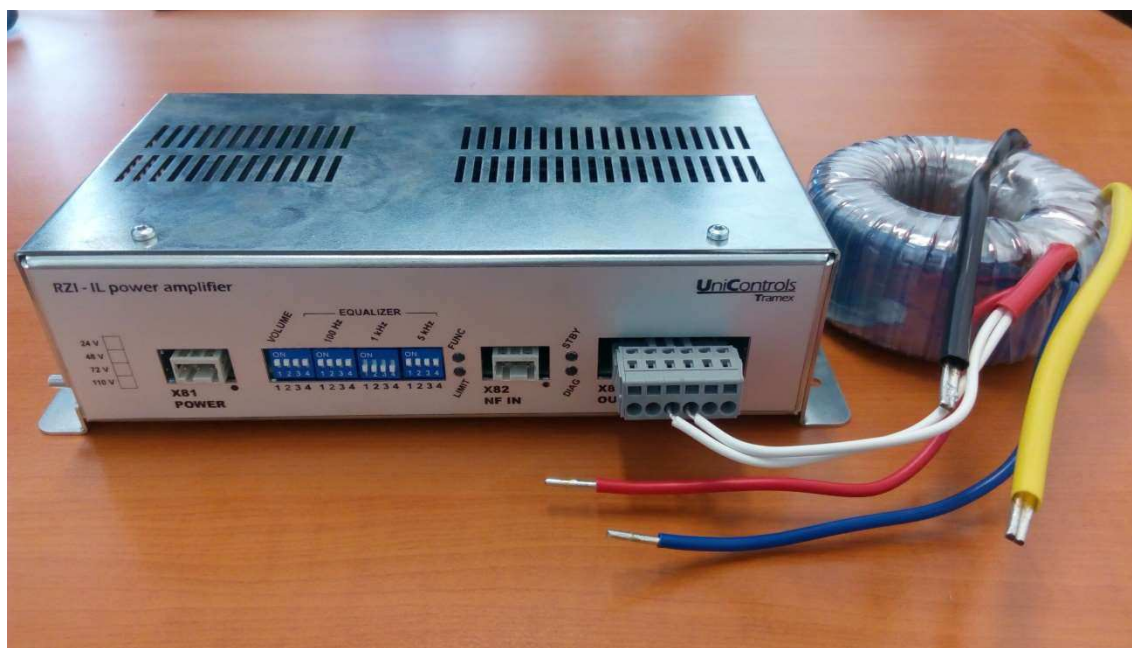
Obr. P. 1: Schéma analogové a digitální části zesilovače





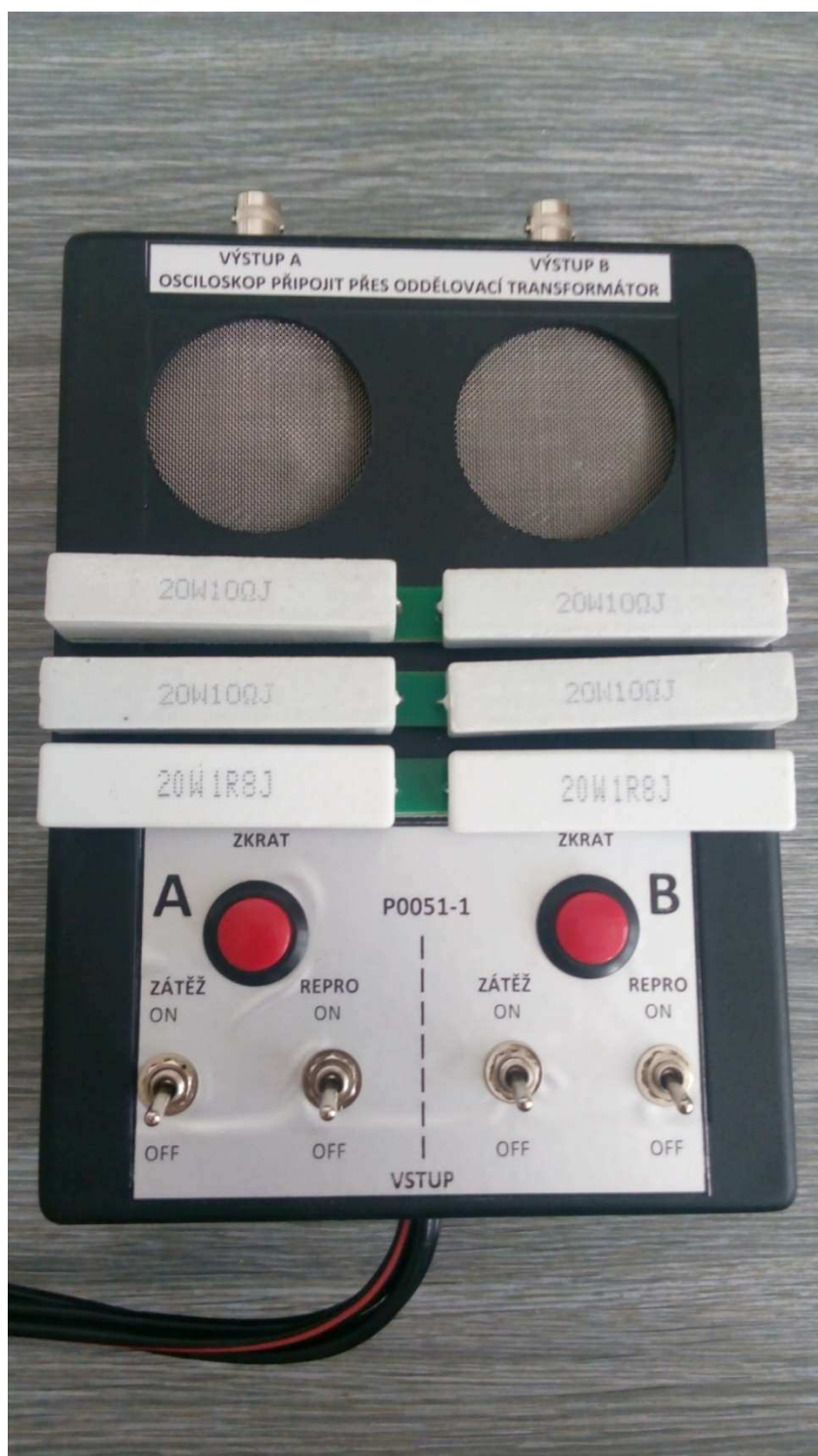
Obr. P. 2: Schéma napájecích zdrojů zesilovače

## Příloha 2: Hotový zesilovač pro indukční smyčku



Obr. P. 3: Hotový zesilovač pro indukční smyčku

## Příloha 3: Přípravek pro zesilovač



Obr. P. 4: Přípravek pro měření a testování zesilovače